

## Erfassung von Gefügeveränderungen in Beton durch Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Einschätzung der Dauerhaftigkeit



## Dissertation

---

F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde  
Bauhaus-Universität Weimar

**Erfassung von Gefügeveränderungen in Beton durch Anwendung  
zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Einschätzung der Dauerhaftigkeit**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur

an der Fakultät Bauingenieurwesen der  
Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von  
Wolfgang Erfurt  
aus Erfurt

Gutachter:

1. Prof. Dr.-Ing. habil. J. Stark
2. Prof. Dr.-Ing. P. Schießl
3. Prof. Dr.-Ing. habil. H. Knake

Tag der Disputation:

09. Juli 2002

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$a$	[cm]	Kantenlänge, Querabmessung Prisma
$d$	[-]	Tage
$E$	[J]	Laserenergie
$\Delta E_{\text{dyn}}$	[%]	relativer dynamischer E-Modul
$E_{\text{dyn}}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	dynamischer E-Modul
$E_B$	[N/mm <sup>2</sup> ]	dynamischer E-Modul der Biegewelle
$E_D$	[N/mm <sup>2</sup> ]	dynamischer E-Modul der Dehnwelle
$E_L$	[N/mm <sup>2</sup> ]	dynamischer E-Modul der Longitudinalwelle
$G_T$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Torsionsmodul
$f$	[Hz]	Frequenz
$f_r$	[Hz]	Resonanzfrequenz
$f_b$	[Hz]	Resonanzfrequenz der Biegewelle
$f_d$	[Hz]	Resonanzfrequenz der Dehnwelle
$f_l$	[Hz]	Resonanzfrequenz der Longitudinalwelle
$f_t$	[Hz]	Resonanzfrequenz der Torsionswelle
$l$	[cm]	Probekörperlänge
$N$	[cm]	Nahfeldlänge
$p$	[N/m <sup>2</sup> ]	Schalldruck
$p_e$	[dB]	Schalldruck einfallende Welle
$p_d$	[dB]	Schalldruck durchgehende Welle
$p_r$	[dB]	Schalldruck reflektierte Welle
$r$	[cm]	Radius einer kreisförmigen Schwingerfläche
$r, F.$	[%]	relative Feuchte
$t_{\text{EB}}$	[h]	Erstarrungsbeginn
$t_{\text{EE}}$	[h]	Erstarrungsende
$T_i$	[-]	Geometriekoeffizient
$t_t$	[μs]	Gesamtlaufzeit (CIF-Test)
$t_c$	[μs]	Laufzeit im Ankoppelmedium
$t_l$	[μs]	Laufzeit der Longitudinalwelle (P-Welle)
$t_d$	[μs]	Laufzeit der Dehnwelle
$t_t$	[μs]	Laufzeit der Transversalwelle (S-Welle)
$t_r$	[μs]	Laufzeit der Oberflächenwelle (R-Welle)
$\hat{t}_b$	[-]	berechneter t-Wert
$\hat{t}_T$	[-]	kritischer t-Wert der Tabelle

$V$	$[\text{dm}^3]$	Volumen
$V_K$	$[\text{dm}^3]$	Volumen Zuschlag
$V_Z$	$[\text{dm}^3]$	Volumen Zementstein
$U$	$[\text{mV}], [\text{V}]$	Spannung
$v_L$	$[\text{m/s}]$	Schallgeschwindigkeit der Longitudinalwelle
$v_P$	$[\text{m/s}]$	Schallgeschwindigkeit der Primärwelle
$v_{TL}$	$[\text{m/s}]$	Schallgeschwindigkeit der Transversal- Longitudinal-Wechselwelle
$v_D$	$[\text{m/s}]$	Schallgeschwindigkeit der Dehnwelle
$v_T$	$[\text{m/s}]$	Schallgeschwindigkeit der Transversalwelle
$v_O$	$[\text{m/s}]$	Schallgeschwindigkeit der Oberflächenwelle
$v_R$	$[\text{m/s}]$	Schallgeschwindigkeit der Rayleigh-Welle
$v_S$	$[\text{m/s}]$	Schallgeschwindigkeit der Scherwelle
$v_B$	$[\text{m/s}]$	Schallgeschwindigkeit im Beton
$v_Z$	$[\text{m/s}]$	Schallgeschwindigkeit im Zementstein
$v_K$	$[\text{m/s}]$	Schallgeschwindigkeit im Zuschlag
$s$	$[\text{cm}]$	Schallweg
$s_l$	$[\text{cm}]$	Schallweg parallel zur Längsachse
$s_q$	$[\text{cm}]$	Schallweg senkrecht zur Längsachse
$z$	$[\text{cm}]$	räumliche Koordinate
$\varepsilon_q$	$[\text{mm}]$	Querdehnung
$\varepsilon_l$	$[\text{mm}]$	Längsdehnung
$\alpha$	$[\%]$	Hydratationsgrad
$\beta_D$	$[\text{N/mm}^2]$	Druckfestigkeit
$\beta_{D(US)}$	$[\text{N/mm}^2]$	Druckfestigkeit aus $v_l$
$\beta_{D(US, P)}$	$[\text{N/mm}^2]$	Druckfestigkeit aus $v_l$ (Messung an Prismen der Abmessungen $80 \times 80 \times 250 \text{ mm}^3$ )
$\beta_{D(US, NP)}$	$[\text{N/mm}^2]$	Druckfestigkeit aus $v_l$ (Messung an NP)
$\beta_{D(US, W)}$	$[\text{N/mm}^2]$	Druckfestigkeit aus $v_l$ (Messung an Würfeln)
$\beta_{D(US, TS)}$	$[\text{N/mm}^2]$	Druckfestigkeit aus $v_l$ (Messung mit TS)
$\beta_{D(NP)}$	$[\text{N/mm}^2]$	Druckfestigkeit Normprismenhälften (zerstörend)
$\beta_{Wm}$	$[\text{N/mm}^2]$	mittlere Würfeldruckfestigkeit (28d- bzw. 56d-Wert) einer Prüfsérie (zerstörend)
$\beta_{BZ}$	$[\text{N/mm}^2]$	Biegezugfestigkeit
$\beta_{BZ 28}$	$[\text{N/mm}^2]$	Biegezugfestigkeit, 28d-Wert, Mittelwert einer Prüfsérie
$\delta$	$[\circ]$	Divergenzwinkel

$\rho_f$	$\text{kg/m}^3$	Frischbetonrohddichte
$\rho_k$	$[\text{kg/m}^3]$	Kornrohddichte der Zuschläge
$\eta$	$[-]$	Verlustfaktor
$\lambda$	$[\text{m}]$	Wellenlänge
$\mu_d$	$[-]$	dynamische Querdehnzahl
$\mu_s$	$[-]$	statische Querdehnzahl
$\upsilon$	$[\text{m/s}]$	Schallschnelle
$\omega$	$[\text{J/cm}^2]$	Energiedichte
$\xi$	$[\text{m}]$	Schallausschlag

### Häufig benutzte Abkürzungen

BK	Bohrkern
BW	Biegewelle
CF	Capillary Suction and Freeze Thaw Test
CDF	Capillary Suction, De-Icing Solution and Freeze Thaw Test
CEM I	Portlandzement
CEM III	Hochofenzement
CIF	Capillary Suction, Internal Damage and Freeze Thaw Test
DW	Dehnwelle
ESEM	Environmental Scanning Electron Microscope
FFT	Fast Fourier Transformation
FTW	Frost-Tau-Wechsel
GE	Gefügeentwicklung
KS	Kapillares Saugen
NB	Nachbehandlungsdauer
NK	Normklima
RZ	Reaktionszeit
SFB	Sonderforschungsbereich
TP	Teilprojekt
TS	Tauchsonde
WL	Wasserlagerung
vWL	verlängerte Wasserlagerung
ZLB	Zementleimbecher

## **Vorwort**

Die in dieser Arbeit vorgestellten Erkenntnisse zur Anwendung akustischer Prüfverfahren für die Erfassung von Gefügeveränderungen im Beton, sollen dazu dienen, die Anwendungsmöglichkeiten der vorgestellten Meßverfahren in der Baustoffforschung und Bauzustandsanalyse aufzuzeigen und für deren Anwendung zu werben.

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar. Die vorgestellten Untersuchungsergebnisse zum Aufbau berührungsloser Diagnoseverfahren, die im Rahmen der Arbeit des Sonderforschungsbereiches 524 entstanden, basieren auf der großzügigen Förderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft. Dank gilt in diesem Zusammenhang auch Herrn Dr. Große, der sich als Vertreter des Thüringer Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kultur für eine schnelle Bereitstellung der finanziellen Mittel zur Anschaffung der erforderlichen Ausrüstungen eingesetzt hat.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. J. Stark für die Betreuung der Arbeit, seinem Interesse an der Thematik und der Diskussionsbereitschaft zur Lösung von Problemen.

Weiterhin danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des F. A. Finger-Institutes für Baustoffkunde, die mich bei der Durchführung der experimentellen Arbeiten unterstützt haben, besonders Herrn Dipl.-Ing. Wilfried Burkert und Herrn Daniel Büchner. Danken möchte ich auch Herrn Dipl.-Phys. Wolfram Köhler für die geleistete Zusammenarbeit im Sonderforschungsbereich 524, Teilprojekt B1. Für die kritischen Hinweise während der Anfertigung der Arbeit danke ich Herrn Dipl.-Ing. Bernd Wicht.

Danken möchte ich auch Herrn Krompholz für die im Ergebnis vieler Diskussionen gegebenen praktischen Hinweise zur Meßmethodik für die Durchführung von Baustoffuntersuchungen und Bauschadensanalysen.

Weimar, im Februar 2002

Wolfgang Erfurt

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>PROBLEMSTELLUNG</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>GEFÜGEVERÄNDERUNGEN UND DAUERHAFTIGKEIT</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Werkstoffliche Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1.1	Gefügeveränderungen durch Umwelteinflüsse	3
2.1.2	Elastische Kennwerte zur Charakterisierung des Betongefüges	11
2.1.3	Kontinuierliche Erfassung von Gefügeveränderungen während der Erhärtung von Beton	27
<b>2.2</b>	<b>Meßtechnische Grundlagen</b>	<b>36</b>
2.2.1	Laufzeitmessung von Ultraschallimpulsen	37
2.2.2	Eigenfrequenzmessung bei Resonanzerregung	45
2.2.3	Eigenschwingzeit nach Impulsanregung	48
2.2.4	Laserverfahren	49
<b>3</b>	<b>ZIELSTELLUNG DER EIGENEN ARBEITEN</b>	<b>56</b>
<b>4</b>	<b>CHARAKTERISIERUNG DES ULTRASCHALLMEßSYSTEMS</b>	<b>58</b>
<b>4.1</b>	<b>Bestimmung der Schallgeberfrequenzen mittels Laservibrometer</b>	<b>58</b>
<b>4.2</b>	<b>Schallübertragung in Abhängigkeit vom Ankoppeldruck</b>	<b>64</b>
4.2.1	Ankopplung an festen Probekörpern	64
4.2.2	Ankopplung an erhärtenden Probekörpern	66
<b>4.3</b>	<b>Berechnung der gerätetechnischen Verzögerungszeiten für direkte Ankopplung</b>	<b>68</b>
<b>4.4</b>	<b>Digitalisierung von Zeitsignalen</b>	<b>71</b>
<b>4.5</b>	<b>Transversalwellen, direkte und indirekte Messung</b>	<b>72</b>
<b>4.6</b>	<b>Anregung von Schallwellen mittels Laser</b>	<b>74</b>
4.6.1	Nachweis der Anregbarkeit von Schallwellen in Baustoffen	74
4.6.2	Einfluß der Strahlparameter	77
<b>4.7</b>	<b>Erfassung von Schallwellen mittels Laservibrometer</b>	<b>82</b>

<b>5</b>	<b>EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUR DAUERHAFTIGKEIT</b>	<b>85</b>
<b>5.1</b>	<b>Prüfung des Frostwiderstandes</b>	<b>85</b>
5.1.1	Versuchsplanung, Probekörperherstellung	86
5.1.2	Probekörperherstellung	88
5.1.3	Frishbetonkennwerte	88
5.1.4	Festbetonkennwerte	89
5.1.5	Wasseraufnahme	90
5.1.6	Abwitterung	93
5.1.7	Innere Schädigung des Betongefüges	96
<b>5.2</b>	<b>Monitoring des Abbindeprozesses von Beton</b>	<b>137</b>
5.2.1	Voruntersuchungen zu den elastischen Kennwerten der verwendeten Zuschläge	138
5.2.2	Erhärtungsdruckfestigkeit von Beton	138
5.2.3	Erhärtungsverlauf von Mörtel und Bindemitteln	148
<b>5.3</b>	<b>Bauwerksdiagnose</b>	<b>151</b>
5.3.1	Berührungslose Erfassung von Baustoffkennwerten	151
5.3.2	Homogenitätsuntersuchungen an Bauwerksteilen	152
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>156</b>
<b>7</b>	<b>AUSBLICK</b>	<b>162</b>
<b>8</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>163</b>
<b>9</b>	<b>ANLAGEN</b>	<b>180</b>
<b>9.1</b>	<b>Mischungsentwurf zur Prüfung des Frostwiderstandes</b>	<b>180</b>
<b>9.2</b>	<b>Mischungsentwurf zur Prüfung der Erhärtungsdruckfestigkeit</b>	<b>182</b>



# 1 Problemstellung

Nach WESCHE [1] bedeutet Dauerhaftigkeit, daß ein Bauwerk und damit auch die im Bauwerk verarbeiteten Baustoffe über die vorgesehene Lebensdauer gegen alle vor auszusehenden Einflüsse bei ausreichender Instandhaltung genügend widerstandsfähig sind. Beton als Baustoff erfüllt in hervorragender Weise die an ihn gestellte Anforderung der Dauerhaftigkeit, wenn unter Beachtung des Verwendungszweckes und der einwirkenden Umwelteinflüsse eine sachgerechte Zusammensetzung der Ausgangsstoffe und deren Verarbeitung erfolgt [2, 3].

Der Zusammenhang zwischen Dauerhaftigkeit und einwirkenden Umwelteinflüssen wird neben der Herstellung und der Verarbeitung des Betons entscheidend durch die Nachbehandlung des Betons, das heißt von der Porosität des Zementsteins im oberflächennahen Bereich (Dichtigkeit) bestimmt. Die Porosität beschreibt ein breites Spektrum unterschiedlicher Porenarten, von den kleinsten Poren, den Gelporen, bis zu den größten Poren, den Verdichtungsporen. Die Dauerhaftigkeit wird jedoch entscheidend vom Kapillarporenanteil beeinflusst. Alle Transportvorgänge in das Betongefüge erfolgen über die Kapillarporen, so auch das Eindringen der Reaktionspartner und zugleich Schadensverursacher wie Feuchtigkeit oder  $\text{CO}_2$ . Eine Schadensverstärkung kann durch einen Frostangriff eintreten, wodurch ein von der Betonoberfläche fortschreitendes Mikrorißsystem weiter in das Betoninnere vordringt und zu weiteren Gefügauflockerungen führt bzw. es kann der Frostangriff der eigentlich auslösende Fakt für alle weiteren Gefügeschädigungen sein.

Zur quantitativen Erfassung von Gefügeveränderungen bzw. Gefügeschädigungen existieren zahlreiche zerstörend und zerstörungsfrei arbeitende Prüfverfahren. Zerstörende Prüfverfahren verdeutlichen als Kennwert der Gefügeschädigung den eingetretenen Festigkeitsrückgang, der z.B. durch Bestimmung der sensibel reagierenden Biegezugfestigkeit dargestellt werden kann. Zerstörungsfreie Prüfverfahren, wie z.B. das Ultraschall- oder Resonanzfrequenzverfahren bringen die Änderungen der elastischen Kennwerte zum Ausdruck, die im Abfall des dynamischen E-Moduls sichtbar werden. Zur Erstellung einer Schadensanalyse (Ursachenforschung) ist die meßtechnische Ermittlung des Zeitpunktes der Entstehung der Gefügeschädigungen genauso von Bedeutung, wie die Darstellung des weiteren Verlaufes während der Durchführung von Dauerhaftigkeitsuntersuchungen. Hieraus leiten sich folgende Anforderungen an das einzusetzende Meßverfahren bzw. an die meßmethodische Vorgehensweise ab:

- Erfassung des momentanen Gefügezustandes durch Einpunktmessungen an einem definierten Meßpunkt oder durch Punktfolgemessungen an einem vorgegebenen Meßraster zur Ermittlung eines Schädigungsgradienten (Schädigungstiefe).

- Kontinuierliche Erfassung von Gefügeveränderungen, die je nach den gestellten Untersuchungsanforderungen in unterschiedlichen Zeiträumen und Meßintervallen durchgeführt werden.
- 2-dimensionale Darstellung der Homogenität von Laborprobekörpern oder Bauwerksteilen durch Angabe der Verteilung von mechanischen (z.B. Festigkeit) oder elastischen Kenngrößen (z.B. dynamischer E-Modul) möglichst in großen Oberflächenbereichen mit hoher Meßpunktdichte. Dies ist notwendig, um geplante Umnutzungen bzw. Nutzungserweiterungen von Bauwerken mit einer höheren Sicherheit planen sowie die aus einer Bauschadensbegutachtung abgeleiteten Sanierungsmaßnahmen mit den erforderlichen Erfolgsaussichten durchführen zu können.
- 3-dimensionale Darstellung von elastischen Eigenschaften (z.B. Schallgeschwindigkeit) zur Erkennung der geometrischen Ausdehnung und Tiefenlage von Inhomogenitäten.

Die Lösung dieser Aufgabenstellungen muß zu einer intensiveren Anwendung von zerstörungsfreien Prüfverfahren vor dem Hintergrund einer ständig alternden Baustanz, deren Erhaltung vorrangiges Ziel der Forschungstätigkeit sein muß [4] und einer notwendigen Qualitätssicherung bei den derzeit praktizierten Fertigungstechniken mit herkömmlichen und neu entwickelten Baustoffen führen.

## 2 Gefügeveränderungen und Dauerhaftigkeit

### 2.1 Werkstoffliche Grundlagen

STARK und WICHT [3] definieren die Dauerhaftigkeit eines Betons als den Widerstand gegenüber äußeren und inneren Einflußfaktoren. Zu den äußeren Einflußfaktoren gehören z.B. Feuchtigkeit, Temperatur, chemischer Angriff und zu den inneren Einflußfaktoren die Hauptbestandteile des Betons, wie Zement, Zusatzstoffe, Wasser und Zuschlag. Diese Widerstandsfähigkeit wurde bisher für Beton auf der Basis der DIN 1045 [5] u.a. durch Angabe des Zementtypes, des Zuschlages, des w/z-Wertes und des Luftgehaltes im Frischbeton im **design concept** gewährleistet. Die in diesem Zusammenhang dominierenden Prüfverfahren sind die Druckfestigkeitsprüfung und der Nachweis der Wasserundurchlässigkeit nach DIN 1048-5 [6]. Mit der Entwicklung von neuen, leistungsfähigen Baustoffen sind Aussagen zu deren Lebensdauer dringend erforderlich, um möglichst kurze Überführungszeiten von der Entwicklung bis zur praktischen Anwendung zu erreichen. Die Überarbeitung der DIN 1045 [5] zur europäischen Norm DIN EN 206-1 [7] legt Grenzwerte für Zusammensetzung und Eigenschaften von Beton unter Beachtung von Expositionsklassen fest, die einwirkende Umwelteinflüsse jedoch nur als getrennt auftretende Wirkmechanismen berücksichtigen können. Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit müssen jedoch Prüfverfahren konsequent nach dem **performance concept** angewendet werden, die konkrete Bewertungskriterien (Grenzwerte) z.B. zur Beurteilung des Frostwiderstandes oder der Sulfatbeständigkeit beinhalten. Da die Kalibrierung dieser Prüfverfahren an den praktischen Erfordernissen ausgerichtet sein muß, besteht die schwierigste Aufgabe darin, Prüfverfahren so zu entwickeln, daß praxisbezogene Grenzwerte zur Dauerhaftigkeit reproduzierbar ermittelt werden können. Dazu ist es erforderlich, daß die während der Prüfung der Dauerhaftigkeit eingetretenen Gefügeveränderungen im Beton mit entsprechenden Meßverfahren so erfaßt werden können, daß z.B. die Änderung des dynamischen E-Moduls als ein Kennwert der Dauerhaftigkeit präzise abgebildet werden kann. Im nachfolgenden Kapitel 2.1.1 werden die Gefügeveränderungen, resultierend aus den naturgegebenen Belastungsarten bzw. aus der Simulation von Dauerhaftigkeitsanforderungen im Labor analysiert. Im Kapitel 2.1.2 werden die wichtigsten Grundbegriffe der akustischen Prüfverfahren zur Erfassung von Gefügeveränderungen erläutert und im Kapitel 2.1.3 kontinuierliche Schallgeschwindigkeitsmessungen zur Untersuchung des Hydratationsverlaufes von Zementleim, Mörtel und Beton vorgestellt.

#### 2.1.1 Gefügeveränderungen durch Umwelteinflüsse

Nach HILSDORF [8] war die internationale Forschungstätigkeit in den letzten Jahrzehnten zur Untersuchung der Dauerhaftigkeit geprägt von den Schwerpunktthemen

Carbonatisierung und Chloridangriff auf im Beton eingebettete Bewehrungsstähle sowie die daraus abzuleitenden erforderlichen Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen.

Weitere Schwerpunkte, die ihren Niederschlag auch in den gegenwärtig bearbeiteten Forschungsthemen finden, beinhalten Untersuchungen zu den ablaufenden chemisch-physikalischen Reaktionen während eines Sulfat-, Frost- und Frost-Tausalz-Angriffs, verspäteter Ettringitbildung und Alkali-Kieselsäure-Reaktion. In der Praxis treten in der Regel durch Überlagerung der verschiedenen Schädigungsmechanismen sehr komplexe Fragestellungen zu den eingetretenen Gefügeveränderungen auf. In den nachfolgenden Ausführungen sollen die jeweils typischen Gefügeschädigungen in der Betonstruktur herausgearbeitet und auf die Darstellung der chemisch-physikalischen Reaktionsmechanismen nur kurz eingegangen werden. Ausführliche Darstellungen können der in jüngster Zeit erschienenen Fachliteratur von STARK und WICHT [3] bzw. den Arbeiten z.B. von SPRINGENSCHMID [9], AUBERG [10], BOLLMANN [11] und LUDWIG [12] entnommen werden. Untersuchungen von JACOBS [13], die Vielfalt der Prüfverfahren zur Dauerhaftigkeit auf die Prüfung einer bautechnisch relevanten Kenngröße, der Gaspermeabilität des Betons zu reduzieren, scheiterten zuletzt an nicht vergleichbaren Feuchtegehalten sowie unterschiedlichen Feuchtegradienten der Probekörper.

#### ♦ *Carbonatisierung*

Die Carbonatisierung ist eine chemische Reaktion, bei der die säurebildenden Gase der Luft (z.B.  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ) in die Betonoberfläche eindringen und die calciumhaltigen Hydratationsprodukte und das hochalkalische Porenwasser neutralisieren. Die Bildung des thermodynamisch stabilen Calcit ( $\text{CaCO}_3$ ) führt durch die Volumenvergrößerung zu einem dichteren Gefüge und zu höheren Festigkeiten, aber gleichzeitig wird durch die pH-Wertabsenkung die Schutzwirkung für den Bewehrungsstahl aufgehoben [3].

Die Ausbildung eines carbonatisierten Randbereiches wird wesentlich durch den w/z-Wert und die Zementart beeinflusst. So steigt mit zunehmendem w/z-Wert der Kapillarporenanteil und die Gaspermeabilität. Die Zunahme der Dicke der Carbonatisierungsschicht kann durch eine lineare Funktion beschrieben werden [1, 3]. Der Einfluß der Zementart wird entscheidend durch den Klinkeranteil geprägt, d.h. Zemente mit einem hohen Klinker- und damit Portlandanteil verlangsamen das Fortschreiten der Carbonatisierungsfrent. Der gleiche Zusammenhang wird Zementen mit einem hohen  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent zugesprochen, wobei der Literatur keine Wichtung der sich überlagernden Prozesse entnommen werden kann. Ausführlich setzten sich STARK und LUDWIG [14, 12] mit dem Einfluß der Carbonatisierung auf das Abwitterungsverhalten von CEM I- und CEM III-Betonen auseinander. Sie stellten fest, daß ausgelöst durch die Carbonatisierung im Randbereich der untersuchten Betone, bei Zementen mit zunehmendem Hüttensandgehalt, neben der entstehenden Gefügevergrößerung (Anstieg der Kapillarporosität) instabile Carbonatisierungsprodukte gebildet werden. Von den drei  $\text{CaCO}_3$ -Modifikationen Vaterit, Aragonit und Calcit ist die chemische Stabilität von Vaterit und Aragonit bei einem Frost-Tausalz-Angriff am geringsten. Dies hat zur Folge, daß durch die Carbonatisierungsschicht eine, im Gegensatz zu den CEM I-Betonen, hohe

Anfangsabwitterung bei Betonen mit einem CEM III/A-Zement und verstärkt bei einem CEM III/B-Zement ausgelöst wird. Der kritische Wert für die Zunahme des Kapillarporenanteiles wird ab einem Hüttensandgehalt von  $> 55 \%$  diskutiert.

Einen weiteren wesentlichen Einfluß auf die Carbonatisierungsgeschwindigkeit hat die Nachbehandlung der Betonoberfläche, die frühestmöglich beginnen muß und zu einer ständigen Verdichtung des Betongefüges durch fortschreitende Hydratation führt. Ein hohes Feuchtigkeitsangebot während der Nachbehandlung setzt die Reaktionsgeschwindigkeit der Carbonatisierung auf einen zu vernachlässigenden Wert herab.

→ **Gefügeveränderung:** dichtere Randzone des Betons in Abhängigkeit von der Carbonatisierungstiefe

◆ *Einwirken von Chloriden*

Chloride können durch die Ausgangsstoffe des Betons in die Betonherstellung eingetragen werden (natürlicher Chloridgehalt). Die zulässigen Höchstwerte für den Chloridgehalt der Ausgangsstoffe sind im Regelwerk vorgeschrieben. Zusätzlich können z.B. Belastungen durch Meerwasser oder Taumittelanwendung entstehen. Bei der Einwirkung von Meerwasser wird in die Dauertauch-, Wechselltauch- und in die Kapillärzone unterschieden. Die Anreicherung von Chloriden beträgt in der Kapillärzone etwa das 4,4-fache gegenüber der in der Dauertauchzone, die aufgrund wassergesättigter Poren außerdem den Sauerstoffzutritt zum Bewehrungsstahl verhindert. Die eigentlich schädigende Wirkung der Chloride besteht in der Auslösung der Korrosion der Bewehrungsstähle. Die Korrosionsprodukte führen zu einer Volumenzunahme, die Rißbildung und letztendlich Absprengung der Betonüberdeckung zur Folge hat. Dieser elektrochemische Vorgang (Sauerstoffkorrosionstyp) wird u.a. begünstigt, wenn das Eindringen der Chloride im bereits carbonatisierten Oberflächenbereich des Betons stattfinden kann, in dem die Passivierung der Bewehrungsstäbe aufgehoben ist. Der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt wird von der Qualität der Betonüberdeckung stark beeinflusst. Er wird in Masseprozent bezogen auf den Bindemittelgehalt angegeben. Um die Dauerhaftigkeit zu gewährleisten, müssen die Transportwege für die Chloridionen bekannt sein. Auch in diesem Zusammenhang spielt der Kapillarporenraum, der vom w/z-Wert, von der Zementart und -menge, den Zusatzstoffen und der Nachbehandlung maßgeblich beeinflusst wird, eine entscheidende Rolle. Die Wirkung der genannten Einflußgrößen soll an dieser Stelle nicht weiter erläutert werden. Mischungsentwurf und fachgerechte Bauausführung müssen so aufeinander abgestimmt sein, daß ein dichtes Betongefüge entsteht und somit der Diffusionswiderstand für das Eindringen der Chloridionen maximal erhöht wird [1, 3, 15].

→ **Gefügeschädigung:** Mikrorißsystem, ausgehend von den gebildeten Korrosionsprodukten der Bewehrung

### ◆ *Frostangriff*

Die Einwirkung von Frost führt bei Betonbauwerken zu einer äußeren und inneren Gefügeschädigung. Die äußere Schädigung ist erkennbar als Oberflächenabwitterung und die innere Gefügeschädigung z.B. meßbar am Abfall der elastischen und mechanischen Kennwerte aufgrund eines ausgebildeten Mikrorißsystems. Erfolgt der Frostangriff unter gleichzeitiger Einwirkung von Taumitteln (z.B. Betonfahrbahndecken), so wird die Oberflächenschädigung verstärkt. Die Abwitterungsmenge und der Grad der inneren Gefügezerstörung korrelieren nicht miteinander. Die Zerstörungsmechanismen können physikalischer und chemischer Natur sein.

Als Hauptursache für einen Frostschaden ist die Volumenzunahme des Wassers von ca. 9 Vol.-% und die dabei auftretenden hohen hydraulischen Drücke während des Gefriervorganges zu betrachten. Poröse Baustoffe, wie z.B. Beton, stellen je nach Gesamtporosität und Porengrößenverteilung unterschiedlichen Ausweichraum zur Verfügung. Entscheidend für die Entstehung von Gefügeschädigungen ist der Grad der Wassersättigung des Porensystems. Folgende Randbedingungen sind zur Erklärung einer Frostschädigung zu beachten:

- Abweichend zum Gefrierpunkt von reinem makroskopischen Wasser bei 0 °C unter Atmosphärendruck auf Meereshöhe können Gefrierpunktniedrigungen durch Druck, im Porenwasser gelöste Stoffe, durch Oberflächenkräfte und durch Unterkühlungseffekte auftreten. Der Einfluß der Oberflächenkräfte dominiert, Unterkühlungseffekte können eine Frostschädigung verstärken (hohe Gefrierarten erforderlich). Die Wirkung von Oberflächenkräften nimmt mit abnehmendem Porenradius zu. Der Zusammenhang zwischen Porenradius und Gefrierpunkt wird als Porenradius-Gefrierpunkt-Beziehung (RGB) bezeichnet. Es können im Zementstein ca. 30–60 % Wasser bei –20 °C [16] ungefroren bleiben,
- die kapillare Wasseraufnahme führt ohne Frostangriff zu keiner Wassersättigung im Porensystem.

SETZER leitet aus der Gefrierpunktniedrigung und dem gleichzeitigen Existieren von Wasser, Eis und Wasserdampf im Porensystem druckinduzierte Transportmechanismen des Wassers ab und stellt zur Erklärung das in [16] präzierte thermodynamische Modell der „Mikroislinsenbildung und Mikroislinsenpumpe“ auf. Der erforderliche Druck zum Transport des Wassers wird von entstehenden Eislinsen, die zuerst in den größeren Kapillarporen während der Gefrierphase entstehen, verursacht. Mit zunehmender Unterkühlung wachsen die Mikroislinsen in kleinere Poren hinein und drücken ungefrorenes Wasser aus den Gelporen hinaus (Gefrierschwinden) zum makroskopischen Eis und friert dort an. Dieser Vorgang beginnt an der Betonoberfläche und setzt sich nach innen fort. Die dann in der Auftauphase eintretende zusätzliche Wasseraufnahme (z.B. extern aus der Prüflösung) wird durch die zunehmend einsetzende Entspannung des Mikrogefüges durch den Abbau der Druckdifferenz zwischen ungefrorenem Wasser und Eis ausgelöst und führt zu einer künstlichen Wassersättigung.

FAGERLUND [17, 18, 19] definiert den kritischen Wassersättigungsgrad, bei dessen Erreichen ein Frost-Tau-Wechsel ausreicht, um eine sofortige Gefügeschädigung auszulösen. Die Ermittlung erfolgt an unterschiedlich wassergesättigten Betonen, durch Bestimmung des E-Modulabfalls.

LUDWIG [12] führte Untersuchungen zum chemischen Schädigungseinfluß auf den Frostwiderstand durch. Bedingt durch niedrige Temperaturen wird das thermodynamische Gleichgewicht in der Porenlösung verschoben, so daß eine Sekundärettringitbildung einsetzen kann. Die innere Sulfatquelle zur Auslösung dieser chemischen Reaktion resultiert aus einer Karbonatreaktion des Monosulfates (AFm-Phase), wodurch als Reaktionsprodukt neben Calcit und Aluminiumhydroxid Gips entsteht, der mit dem noch vorhandenen Monosulfat zu stabilen Ettringit reagieren kann, welcher in Poren und Mikrorissen erneut auskristallisiert [12, 20, 21]. Das Schädigungspotential dieser Reaktion wurde bisher nicht quantifiziert, es dürfte jedoch z.B. bei hochfesten Betonen, die ohne LP-Mittel (kein Ausweichraum für Phasenneubildungen) und mit niedrigen w/z-Werten hergestellt werden, von großem Interesse sein, Bild 2.1 .

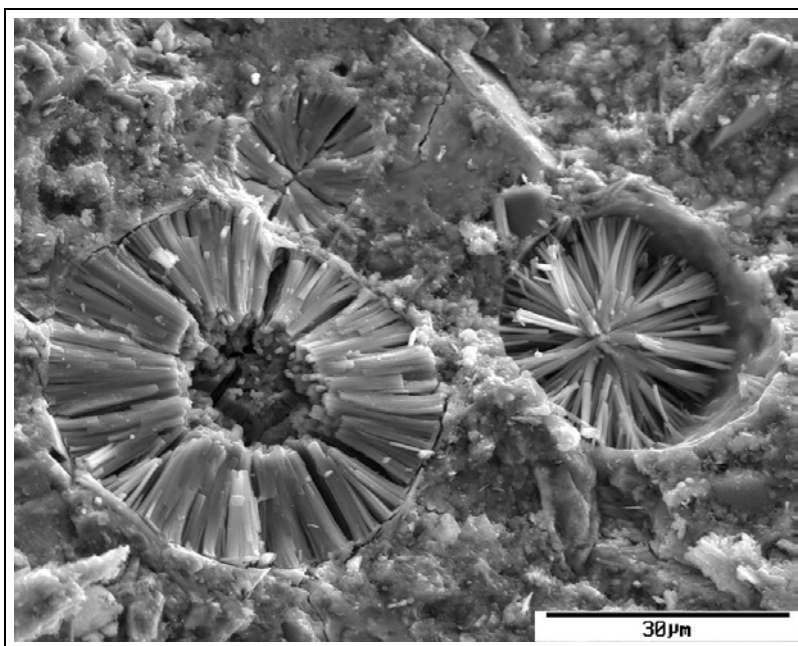


Bild 2.1: Luftpore im Zementstein gefüllt mit Phasenneubildungen, Ettringit wächst von der Porenwand in den Innenraum (ESEM-Aufnahme) [22]

Eine der wichtigsten Einflußgrößen auf den Frostwiderstand ist der Hydratationsgrad, der bei CEM I-Zement und CEM III-Zement nach einer Hydratationszeit von 28 Tagen zu unterschiedlichen Porengrößenverteilungen führt. Das für einen hohen Frostwiderstand erforderliche dichte Betongefüge kann nur durch eine ausreichend lange Nachbehandlung bei CEM III-Betonen sichergestellt werden.

Eine ausführliche Darstellung der komplex ablaufenden Zerstörungsmechanismen wird z.B. in [10, 12, 3, 16] erörtert.

→ **Gefügeschädigung:** Gradient in Abhängigkeit von der Wassereindringtiefe und der Wassersättigung während des Frostangriffes, Mikrorißsystem im Zementstein.

♦ *Sulfatangriff*

Der Sulfatangriff wird durch eine äußere (z.B. sulfathaltige Wässer) oder innere Sulfatquelle (z.B. Injektage von Zementsuspension mit Standard- $C_3A$ -Gehalten in gipshaltiges Mauerwerk) von freien Sulfationen ausgelöst. Die chemischen Reaktionspartner sind die Klinkerminerale  $C_3A$  und  $C_4AF$ . Als Reaktionsprodukte entstehen schwerlösliche, komplexe Calciumaluminatsulfathydrate, z.B. Ettringit, wobei die Reaktionsgeschwindigkeit entscheidend von der Reaktivität des  $C_3A$  bestimmt wird. Durch die Ettringitbildung werden erhebliche Dehnungen (Quellen) im Betongefüge verursacht, die nach einem kurzzeitigen Anstieg der Festigkeit (Zuwachsen des nutzbaren Porenraumes) zu einem Festigkeitsabbau, verursacht durch Rißbildung, führen. Die eigentlich schädigende Wirkung von Ettringit wird im Zusammenhang mit dem jeweiligen Habitus des Ettringits (büschelförmige, lange Nadeln oder kolloider Zustand) diskutiert, der vom pH-Wert und der Alkalität (gelöstes  $Ca(OH)_2$ , Natriumäquivalent) der Porenlösung abhängig ist, Bild 2.2 [3].

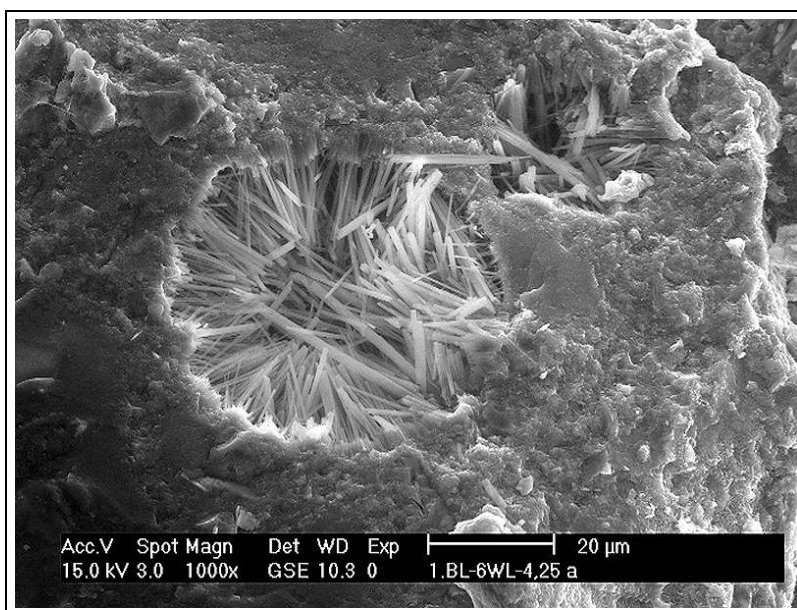


Bild 2.2: Ettringit in einer Luftpore, gerichtetes Wachstum (ESEM-Aufnahme)[3]

Für die Sulfatbeständigkeit eines Portlandzementes ist nach DIN 1164 [23] ein  $C_3A$ -Gehalt  $< 3 \%$  vorgeschrieben. Hochofenzemente erfordern unabhängig vom  $C_3A$ -Gehalt des Portlandzementklinkers einen Hüttensandgehalt  $> 65 \%$ , um die erforderliche Dichtigkeit des Betongefüges zu erreichen. Eine hohe Beständigkeit wird bei nicht sulfatbeständigen Portlandzementen durch die puzzolanische Bindung von  $Ca(OH)_2$  und die gefügeverdichtende Wirkung von Flugasche und Mikrosilica erzielt [3].

→ **Gefügeschädigung:** Gradient in Abhängigkeit von der Eindringtiefe der Sulfationen, Mikrorißsystem im Zementstein.



### ◆ *Verspätete Ettringitbildung*

Ettringit entsteht im Frischbeton aus der chemischen Reaktion des  $C_3A$  mit dem im Zement vorhandenen Sulfatträger (Erstarrungsregler) unter Anwesenheit von  $Ca(OH)_2$  nach der Wasserzugabe. Nach Verbrauch des Sulfatträgers wird neben Ettringit Monosulfat gebildet. Ettringit kann im Festbeton in unterschiedlichen Erscheinungsformen (z.B. parallel angeordnete, prismatische Kristalle) in Abhängigkeit von den chemisch-physikalischen Verhältnissen (z.B. pH-Wert, Porensystem) vorliegen, wobei die betonschädigende Wirkung nach MEHTA [24] von einem mikrokristallin verteilten Ettringit ausgeht (kleine stäbchenförmige Kristalle), der bei Ausbildung entsprechender Mengen im Betongefüge durch Wasseranlagerung (Quellwirkung) Treiberscheinungen auslöst [3, 22].

Eine betonschädigende Ettringitbildung kann durch unterschiedliche Prozesse ausgelöst werden:

- Überschreiten einer kritischen Temperatur durch unsachgemäße Wärmebehandlung, die zu einer Verringerung der thermodynamischen Stabilität von Ettringit zugunsten des Monosulfates führt. Ein Herabsetzen dieser kritischen Temperatur wird durch hohe Alkaliegehalte in der Porenlösung verursacht. Die Nutzungsbedingungen mit häufig einsetzender Temperaturabsenkung und Durchfeuchtung des Betons führen zur Auslösung von Treiberscheinungen durch Umwandlung des instabilen Monosulfates (Sulfatquelle: durch die Wärmebehandlung nicht gebundene  $SO_4^{2-}$ -Ionen) zu Ettringit [22, 3].
  - Auftreten von höheren Temperaturen (z.B. intensive Sonneneinstrahlung) mit wechselndem Feuchtigkeitsangebot, die während der Nutzung von Bauwerken auftreten (z.B. Betonfahrbahndecken: Feuchtigkeitseintrag durch Niederschlag und einwirkenden Fahrverkehr). Die Menge an neugebildetem Ettringit ist abhängig von der Intensität der Austrocknung und Wiederbefeuchtung. Als innere Sulfatquelle kommen z.B. die in der Porenlösung vorhandenen, mobilen Sulfationen sowie durch das während der Frost-Tausalz-Belastung aus der Karbonatreaktion des Monosulfates entstehende  $CaSO_4$  in Betracht. Der Feuchte- und Stofftransport im Betongefüge wird begünstigt durch Mikroschäden (Vorschädigung) und hohe Kapillarporosität. Nach BOLLMANN und STARK [22] ist der primär gebildete Ettringit bei hohen pH-Werten nicht nachweisbar, eine pH-Wertabsenkung durch Auswaschung der Alkalien führt zur Rekristallisation von Ettringit in Poren und Mikrorissen.
- **Gefügeschädigung:** Gradient in Abhängigkeit von der Intensität des Feuchte- und Stofftransportes, Rißbildung ausgehend von Phasenneubildungen (Ettringit) in Poren und Grenzflächen zwischen Zementstein und Zuschlag.

### ♦ Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) ist eine chemische Reaktion zwischen der reaktiven Form des Siliciumdioxides ( $\text{SiO}_2$ ) der Betonzuschläge und den Alkalihydroxiden ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$ ) der Porenlösung. Als Reaktionsprodukt entsteht bei gleichzeitiger Wasseraufnahme das treibende Alkali-Kieselsäure-Gel, welches den umgebenden Porenraum ausfüllt und im weiteren Reaktionsverlauf hohe Quelldrücke aufbaut. Die Folge sind vom reaktiven  $\text{SiO}_2$ -Korn ausgehende Spannungen, die zur Rißbildung im Zementstein und zuletzt im Zuschlag führen. Als Hauptursachen für die Löslichkeit des  $\text{SiO}_2$  sind Störungen im Kristallgitteraufbau (amorphe, kryptokristalline Bereiche) und eine hohe Hydroxidionenkonzentration (pH-Wert) zu nennen. Der amorphe Zustand ist gekennzeichnet durch eine geringere Vernetzung der Si-O-Si – Bindungen (Einbau von OH-Gruppen) und durch eine ungeordnete Verbindung der  $\text{SiO}_4$ -Tetraeder. Eine schädigende Hydroxidionenkonzentration kann durch einen zu hohen Gesamtalkaligehalt ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent,  $\bar{N}$ ) des verwendeten Zementes entstehen. Die Auslösung der schädigenden Reaktion ist von dem Eindringvermögen des Wassers in die Betonoberfläche abhängig. Zu den AKR-empfindlichen Zuschlägen gehören z.B. Opalsandstein, Flint, Kieselkalke, Porphyre und Grauwacken [3, 25].

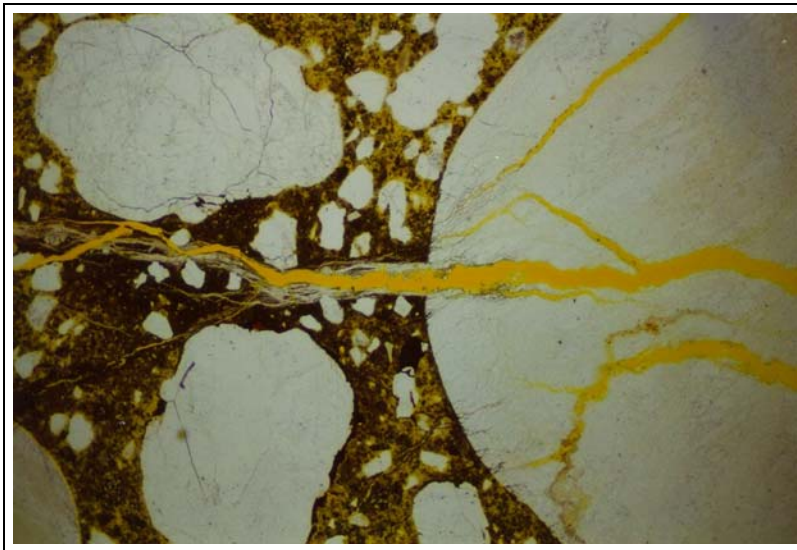


Bild 2.3: Rißbildung durch AKR im Zuschlagkorn und Zementstein, Dünnschliff, 30fache Vergrößerung, parallele Polarisation [25]

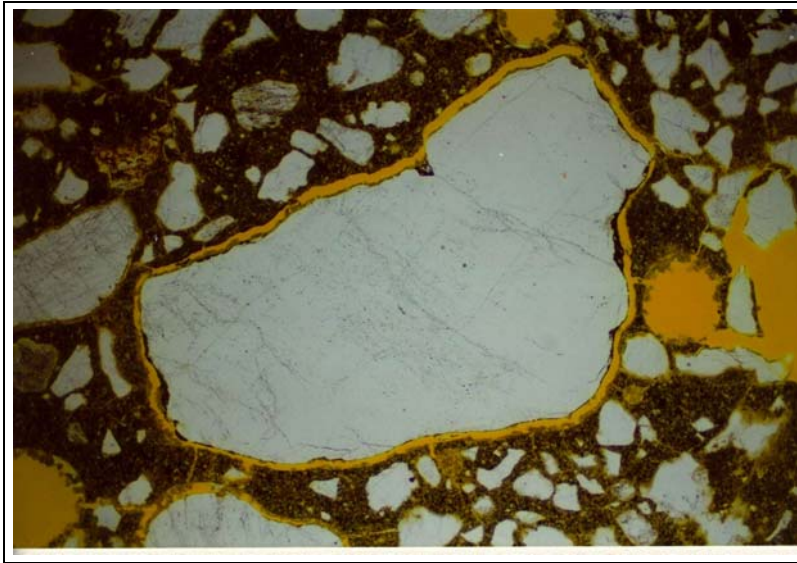


Bild 2.4: Rißbildung um Zuschlagkorn durch späte Ettringitbildung [25]

Bild 2.3 und Bild 2.4 verdeutlichen die unterschiedlichen Schadensbilder einer AKR und einer späten Ettringitbildung. Das Bild 2.3 zeigt das vom Zuschlagkorn ausgehende, sich in den Zementstein fortpflanzende Rißbild, Bild 2.4 veranschaulicht eine für eine späte Ettringitbildung typische Rißbildung, die ausgehend von der Kontaktzone zwischen Zuschlag und Zementstein sich zu einem System von peripheren Rissen um das Zuschlagkorn ausbildet [3].

→ **Gefügeschädigung:** Gradient in Abhängigkeit von der Wassereindringtiefe, Rißbildung im Zementstein und Zuschlag.

### 2.1.2 Elastische Kennwerte zur Charakterisierung des Betongefüges

Zur Erfassung und Visualisierung von Gefügeveränderungen existieren zahlreiche Untersuchungsverfahren, von denen die Lichtmikroskopie und die Rasterelektronenmikroskopie (REM) mit dem neuesten Entwicklungsstand der atmosphärischen Rasterelektronenmikroskopie (ESEM) mit zu den aussagekräftigsten und in ihren Darstellungsmöglichkeiten zu den beeindruckendsten Untersuchungsmethoden zählen. Der apparative und präparative Aufwand ist jedoch außerordentlich hoch. Da die genannten Untersuchungsmethoden das Betongefüge mit einer hohen bzw. extrem hohen Auflösung darstellen, können zwangsläufig die Ergebnisse nur auf einen sehr kleinen Ausschnitt des untersuchten Probekörpers übertragen werden. In vielen Anwendungsfällen ist es jedoch sinnvoll, erst im Bereich von Gefügeveränderungen (fortschreitende Hydratation) oder Gefügedefekten (Frostschädigung), die durch Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren in einem größeren Probekörpervolumen detektiert wurden, mikroanalytisch weiter zu untersuchen. Die daraus abzuleitenden Anforderungen an derartige Untersuchungsverfahren bzw. -methoden können nur durch zerstörungsfrei arbeitende Meßverfahren erfüllt werden, wobei aus der Vielzahl der Verfahren nur die akustischen Meßverfahren in die weiteren Ausführungen einbezogen werden sollen.

Die akustischen Meßverfahren beinhalten, daß mechanische Schwingungen (z.B. Ultraschall) auf einen Körper übertragen werden oder durch Auslösung von bruchmechanischen Vorgängen (Schallemmission) im Gefüge entstehen. In Abhängigkeit von der Art der Anregung entsteht eine von der Schallquelle ausgehende und vom Probekörper beeinflusste charakteristische Ausbreitung des Schallfeldes, welches am Empfänger z.B. hinsichtlich Ausbreitungsgeschwindigkeit, Schalldruck, Dämpfung und Frequenzgehalt ausgewertet wird oder es entstehen durch Anregung stehender Wellen sogenannte Eigenschwingungsmoden (z.B. Eigenschwingzeitmessung).

Die Erläuterung der Grundbegriffe der Akustik und physikalischen Gesetzmäßigkeiten, die aus dem Schwingungsverhalten von homogenen, isotropen Festkörpern abgeleitet wurden, soll nur insoweit vorgenommen werden, wie es für das Verständnis dieser Arbeit erforderlich ist. Ausführliche Darstellungen können z.B. [26, 27, 28, 29] entnommen werden.

#### ♦ *Anregung von elastischen Wellen*

Eine mechanische Welle baut sich aus den Schwingungen der einzelnen Stoffteilchen auf [26]. Als Grundmodell dient die Auslenkung eines Masseteilchen eines Einpunktschwingers, Bild 2.5a. Ist die Rückstellkraft des ausgelenkten Teilchen der momentanen Auslenkung aus der Ruhelage proportional, so entsteht eine harmonische Schwingung, deren Weg-Zeit-Diagramm eine Sinuskurve ist. Die Beschreibung dieser Schwingung erfolgt durch die physikalischen Größen *Schwingungsdauer*, *Frequenz*, *Amplitude* und *Phase*. Sinusschwingungen können in einem schwingungsfähigen System (Resonator) als erzwungene und als freie Schwingungen erzeugt werden. Erzwungene Schwingungen entstehen durch eine harmonisch veränderliche Kraft, die nach einer bestimmten Einschwingzeit dem System die Frequenz der angreifenden Kraft aufzwingt. Die Amplitude dieser Schwingung ist am größten, wenn im Resonanzfall Erregerfrequenz und Eigenfrequenz des Körpers übereinstimmen. Eine einmalige Impulsanregung führt zur Anregung einer freien Schwingung, das System schwingt frei in seinen Eigenfrequenzen.

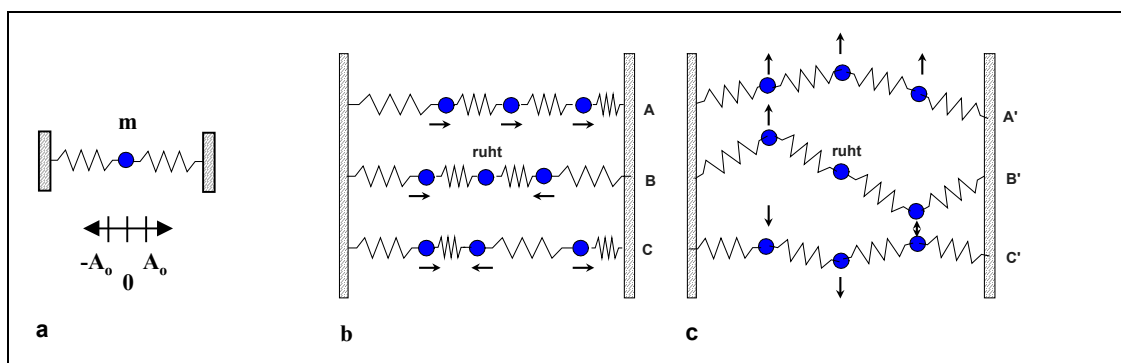


Bild 2.5: (a) Modell des einfachen Federpendels, (b) Modell des gekoppelten Federpendels für die Entstehung von Longitudinalschwingungen, (c) von Transversalschwingungen in endlichen Körpern [30]

Im Realfall klingt die Schwingung mit der Zeit ab, das heißt, Bewegungsenergie geht verloren, in dem sie in Reibungswärme umgesetzt wird [30, 29]. Die Schwingung wird als gedämpfte Schwingung bezeichnet.

Durch die Kopplung der Teilchen, Bild 2.5b und c, erfolgt eine Übertragung der Schwingungsenergie zwischen den Teilchen. Dieser Vorgang läuft um so schneller ab, je starrer die Kopplung zwischen den Teilchen ist. Jedes Masseteilchen ist am Transport von Schwingungsenergie beteiligt. Die Überlagerungen von Schwingungen können vielfältiger Natur sein. Überlagern sich Wellen gleicher Frequenz und Amplitude, die sich gegenläufig ausbreiten und an Grenzflächen reflektiert werden, so bilden sich stehende Wellen aus. Die stehende Welle hat Knotenflächen im Abstand  $\lambda/2$ , in denen die Teilchen ruhen. Dazwischen liegen Bauchflächen mit maximaler Schwingungsamplitude. Erfolgt die Reflexion an einem Medium mit kleinerem Wellenwiderstand (z.B. Luft) so erfolgt die Reflexion ohne Phasensprung (z.B. frei schwingender Stab). Eigenschwingungen mit der niedrigsten Eigenfrequenz werden als Grundschiwingung oder 1. Eigenschwingung bezeichnet [29].

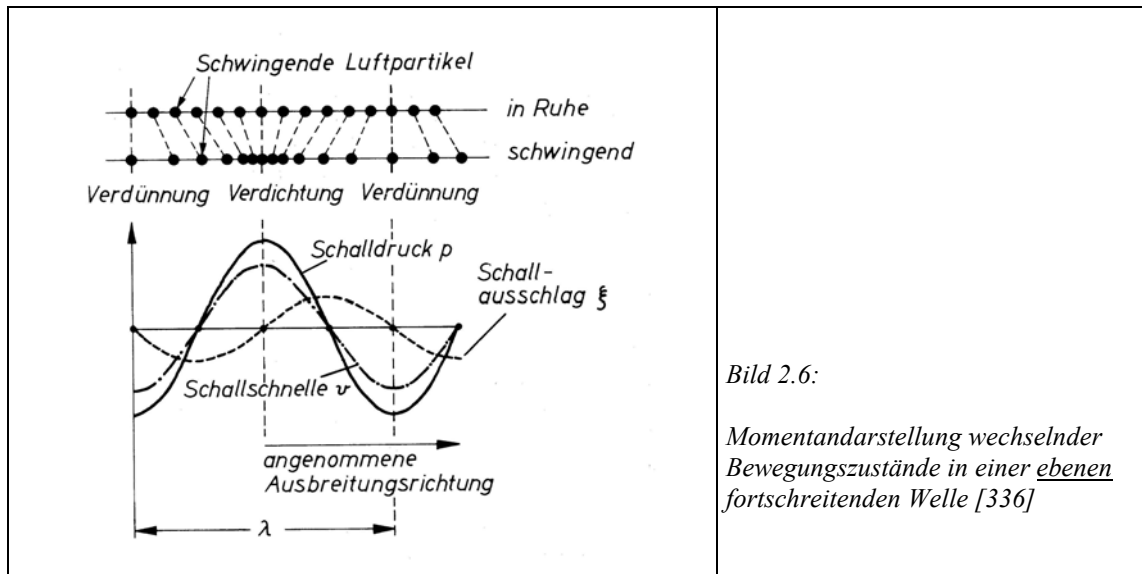
Schwingungen können sich in Frequenz, Amplitude, Phase und Ausbreitungsrichtung unterscheiden. Erfolgt z.B. eine periodische Anregung der Teilchen durch unterschiedliche Frequenzen, so schwingen die Masseteilchen für sich harmonisch, die Gesamtbewegung des Systemes ist durch eine anharmonische Schwingung charakterisiert, die eine Überlagerung unendlich vieler Sinusschwingungen darstellt. Stehen die Frequenzen der harmonischen Teilschwingungen in einem ganzzahligen Verhältnis zur tiefsten vorkommenden Grundfrequenz, so kann durch Anwendung der Fourier-Analyse die Amplitudenfunktion einer anharmonischen Schwingung dargestellt und die Berechnung der Fourierkoeffizienten (Größe des Betrages der n-ten harmonischen Teilschwingung) vorgenommen werden [30]. Durch die Fourier-Analyse wird ein Klang (periodische, nichtharmonische Schallwelle) in die Grundelemente reiner Sinusschwingungen, also Töne zerlegt, die durch Amplitude, Frequenz und Phase gekennzeichnet sind. Das Spektrum eines Tones ist eine einzelne Spektrallinie bei der Kreisfrequenz  $\omega_0$ , das Spektrum des Klanges sind diskrete, gleichabständige Linien [29].

Wird ein Resonator an einer bestimmten Stelle zum Schwingen angeregt, so breiten sich diese räumlich als Welle aus [30]. Dabei sind die Masseteilchen durch elastische Kräfte an ihre Stellen gebunden, sie schwingen nur um ihre Ruhelage und transportieren die Schwingungsenergie. Da die Anregung der Masseteilchen nicht phasengleich erfolgen kann, (die Übertragung der Schwingungsenergie verbraucht Zeit), entstehen durch die Phasenverschiebung Zonen, in denen sich die Teilchen in ihrer Schwingungsrichtung aufeinander zu bewegen (Verdichtungszone) und Zonen in denen sie sich voneinander weg bewegen (Verdünnungszonen). Dieser ständige Wechsel der Bewegungszustände führt zur Ausbreitung einer elastischen Welle. Zur Beschreibung einer elastischen Welle sind zusätzlich zu den zur Charakterisierung einer Schwingung genannten Größen, die physikalischen Größen *Wellenlänge*, *Polarisation* und *Ausbreitungsgeschwindigkeit* erforderlich. Bild 2.6 (oberer Bildausschnitt) veranschaulicht die Änderung der Bewe-

gungszustände in einem elastischen Medium. Im unteren Bildausschnitt ist die Reaktion des Schallfeldes vereinfacht als fortschreitende ebene Welle, charakterisiert durch die Schallfeldgrößen *Schalldruck*  $p$ , *Schallschnelle*  $v$  und *Schallausschlag*  $\xi$ , dargestellt [26, 31].

#### ♦ *Schallfeldgrößen*

Der Schalldruck  $p$  entsteht durch die wechselnde Folge der Verdichtung und Verdünnung, das heißt durch Über- und Unterdruck. Diese wiederholen sich jeweils im Abstand einer Wellenlänge  $\lambda$ . Die Druckschwankungen, auch als Schallwechseldruck  $\Delta p$  bezeichnet, sind dem normalen atmosphärischen Druck überlagert. Im Maximum bzw. Minimum des Schallausschlages (Auslenkung der Mediumsteilchen) ist die Schallschnelle gleich Null (Phasenverschiebung um  $90^\circ$ ). Sie ist dort am größten, wo sich der Schallausschlag am schnellsten ändert. Schalldruck und Schallschnelle ändern sich phasengleich und transportieren somit die Schallenergie [31].

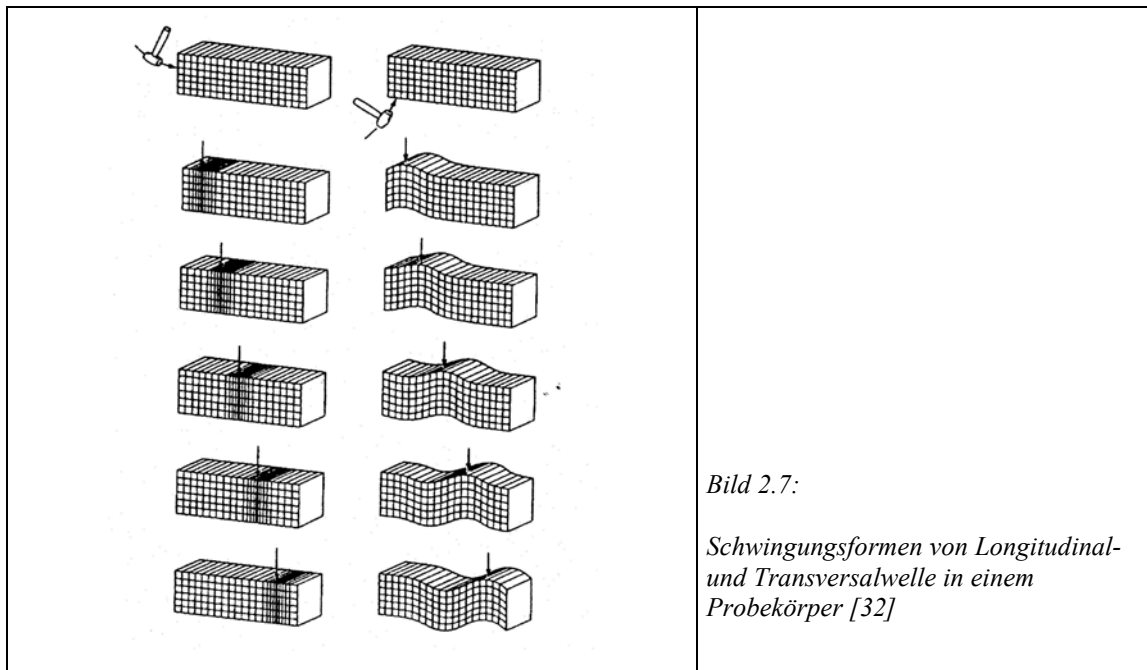


Unabhängig von der jeweiligen Wellenart, bildet sich ausgehend vom Schallgeber, ein *Schallfeld* aus, das durch ein *Nah- und Fernfeld* gekennzeichnet ist (siehe Kapitel 4.1).

#### ♦ *Ausbreitung von Schwingungen - Wellenarten*

Ist die Schwingungsrichtung (Polarisierung) parallel zur Ausbreitungsrichtung, so entstehen Longitudinalwellen, erfolgt sie senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, werden Transversalwellen ausgebildet. Longitudinalwellen können in festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen angeregt werden. Reine Transversalwellen sind dadurch gekennzeichnet, daß nur Schubdeformationen, aber keine Volumenänderungen erfolgen. Sie entstehen nur in festen Körpern. Die Entstehung von Longitudinalwellen (geophysikalische Bezeichnung: P-Welle) setzt eine unbehinderte Wellenausbreitung im sogenannten „unendlich ausgedehnten Medium“ voraus, in dem nur noch Transversalwellen

(geophysikalische Bezeichnung: S-Welle) entstehen können. Aus diesem idealisierten Zustand, der in der praktischen Baustoffprüfung nicht vorkommt, können alle Wellenbewegungen aus der elastischen Grundgleichung abgeleitet werden [27]. Bild 2.7 veranschaulicht die räumliche Ausbreitung dieser beiden Wellenarten.



Im endlichen Raum ist eine Längsdehnung immer mit einer Querkontraktion verbunden. Durch die endliche Ausdehnung von Probekörpern entstehen Dehn-, Biege-, Torsions- und Oberflächenwellen. Die Phasengeschwindigkeit ist von der Wellenlänge abhängig, Gleichung (2.1). Für Schallgeschwindigkeitsmessungen an endlichen Probekörpern sind daher ihre Mindestabmessungen von großer Bedeutung [33, 34], die im engen Zusammenhang zur Wellenlänge  $\lambda$  betrachtet werden müssen:

Die Wellenlänge  $\lambda$  ist definiert:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.1)$$

$v$  : Ausbreitungsgeschwindigkeit  
 $f$  : Eigenfrequenz des Schallgebers

Wie bereits erörtert, entstehen reine Longitudinalwellen, wenn  $\lambda_L \ll s_l$  ist. Ausgehend von der Näherung, daß  $v_T \approx 0,5 v_L$  (bzw.  $v_T = 0,6 v_L$  bei  $\mu_d = 0,22$ ) ist, besteht analog die Forderung für eine ungestörte Transversalwellenausbreitung, daß  $\lambda_T \ll s_q$  ist. Als Grenzwert für das Bestehen des „unendlich ausgedehnten Mediums“ sind in der Litera-

tur für die in der Baustoffprüfung sinnvoll anzusehenden Abmessungen für das Verhältnis  $s_l$  zu  $\lambda_L$  bzw.  $s_q$  zu  $\lambda_T$  unterschiedliche Angaben zu finden, nach [33, 35] beträgt dieser Grenzwert  $\geq 2$ , nach [36]  $\geq 1,5$ . Ist  $s_l \gg \lambda_L$  und  $s_q < \lambda_L$  so wird die Longitudinalwelle in zunehmendem Maße von Dehnwellenanteilen überlagert. Nach [36] kann bei Stäben erst bei einem Verhältnis  $\varnothing/\lambda < 0,2$  eine reine Dehnwelle entstehen.

*Dehnwellen* können als Sonderform der Longitudinalwelle angesehen werden, deren Ausbreitungsgeschwindigkeit mit zunehmender Schlankheit des Probekörpers und einsetzender Querkontraktion nur noch von der Dichte und den elastischen Eigenschaften des Ausbreitungsmediums abhängig ist [27].

*BiegeWellen* werden aufgrund ihrer leichten Anregbarkeit am häufigsten zur Darstellung von elastischen Eigenschaften benutzt. Die Masseteilchen werden gegensinnig in Achsrichtung gedehnt und gestaucht. Die Resonanzen der Biegeschwingung haben verstärkt die Eigenschaft der Dispersion. Ein angeregter Stab teilt sich in nicht äquidistante Teile auf, es entstehen zwei Knotenflächen. Die Eigenfrequenzen liegen unharmonisch zur Grundschiwingung [33, 37]. Die Schwiingungsrichtung ist senkrecht zur Ausbreitungsrichtung [27].

*Oberflächenwellen* breiten sich von der freien Oberfläche gegen das Innere des Körpers aus, die Amplituden nehmen dabei exponentiell ab [27]. Die Eindringtiefe wird nach [38] mit ca.  $1/3$  der Wellenlänge  $\lambda$  angegeben.

*Torsionswellen* sind Sonderformen der Transversalwellen, die in begrenzten Medien, wie Stäben, auftreten. Die Schwiingungsrichtung ist senkrecht zur Ausbreitungsrichtung [39].

Die im Zusammenhang mit dem Ultraschallverfahren noch diskutierten Wellenarten sind die *Transversal-Longitudinal-Wechselwelle* und die *Kopfwelle*, die bei der Schrägdurchschallung im Bereich von Bauwerkskanten angewendet werden [40]. Ausführliche Darstellungen zu anderen Wellenarten (z.B. Plattenwellen) sind [26] zu entnehmen.

Beeinflusst wird die jeweils angeregte Wellenart, die aufgrund der in der Baustoffprüfung verwendeten Probekörpergeometrien eine Überlagerung von Longitudinal- und Dehnwellenanteilen darstellt, von dem Übertragungsverhalten der Elemente der Meßkette, insbesondere von den im Sendeimpuls des Schallgebers enthaltenen Frequenzen und deren Intensität (siehe Kapitel 4.1) und von der akustischen Grenzfrequenz des Baustoffgefüges, die als die höchste noch übertragbare Frequenz als Grenzwert für den jeweils aktuellen Gefügezustand des untersuchten Probekörpers zu betrachten ist. Sie verschiebt sich mit zunehmender Schädigung des Gefüges zu niedrigeren Frequenzen. Auf die Auswirkung dieser Frequenzverschiebung auf die Bestimmung des Schwiingungseinsatzes der P-Welle wird im Kapitel 2.2.1 noch eingegangen.

Bild 2.8 gibt einen Überblick zu den akustischen Meßverfahren, die im experimentellen Teil dieser Arbeit verwendet wurden, einschließlich der für die Baustoffuntersuchung meßtechnisch relevanten Wellenarten sowie der gebräuchlichen Meßmethoden zur Bestimmung der Signaldämpfung.



TEODORU [41] gibt als Literaturlauswertung einen Gesamtüberblick zu den zerstörungsfreien Prüfverfahren, die im Zusammenhang mit Betonuntersuchungen angewendet werden.

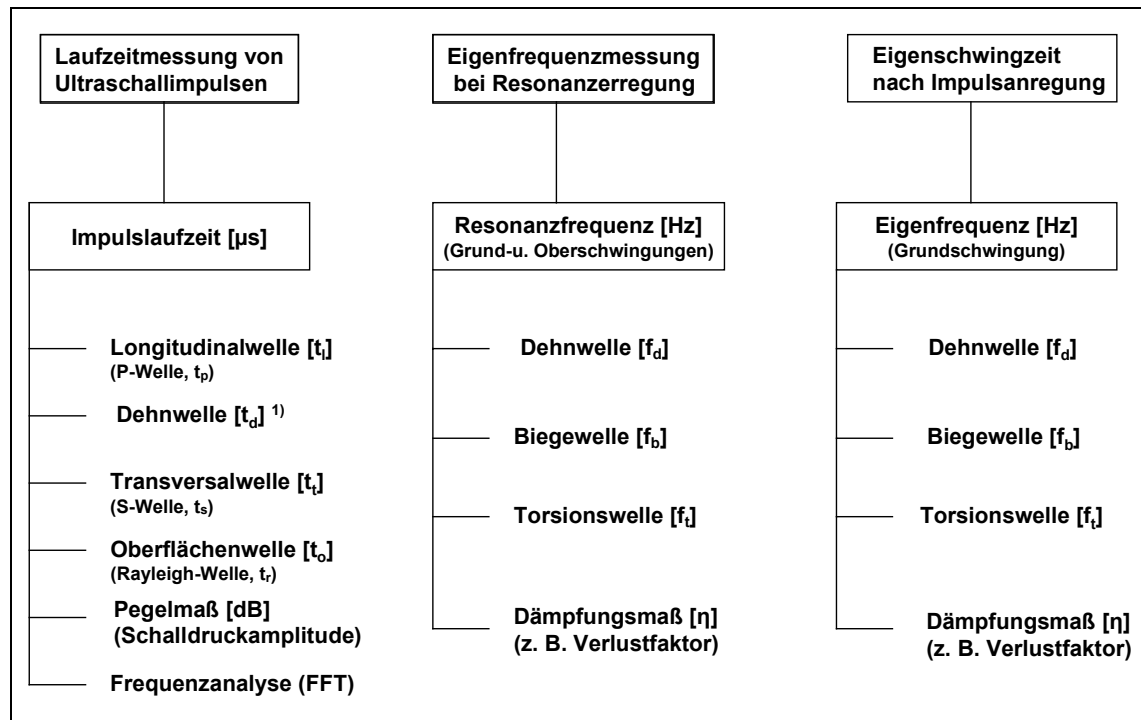


Bild 2.8: Übersicht der meßtechnisch relevanten Wellenarten ausgewählter akustischer Meßverfahren, sowie der gebräuchlichen Meßmethoden zur Bestimmung der Signaldämpfung

Um Eigenschwingungen zu visualisieren (Bild 2.9, Bild 2.10 und Bild 2.11) wurden Untersuchungen zur 3D-Darstellung der Eigenschwingungsformen an einem Betonprisma der Abmessungen 80 x 80 x 250 mm<sup>3</sup> durchgeführt. Visualisiert wurden die Bewegungszustände im Resonanzfall mit Dauerschallanregung. Die Anregung erfolgte mit einem resonanten 30 kHz Schallgeber der Baureihe SW 30 der Firma GEOTRON. Die Amplitudenverteilung des Schallgeberspektrums (Bild 2.12) sowie die Resonanzschwingungen der angeregten Schwingungsmoden des Probekörpers wurden mit einem Laser-Scanning-Vibrometer der Firma POLYTEC vom Typ PSV 300 F aufgezeichnet. Die Berechnung der Resonanzfrequenzen erfolgte aus einem gemittelten FFT-Spektrum von 128 Meßpunkten des Meßrasters.

Die mit dem Laservibrometer ermittelten Resonanzfrequenzen wurden mit einem GRINDO-SONIC Meßgerät MK 5 nochmals aufgenommen und verglichen. Die Meßwertunterschiede beider Meßmethoden betragen < 1 % und liegen somit ungeachtet unterschiedlicher Anregungsarten im Bereich der Meßunsicherheit.

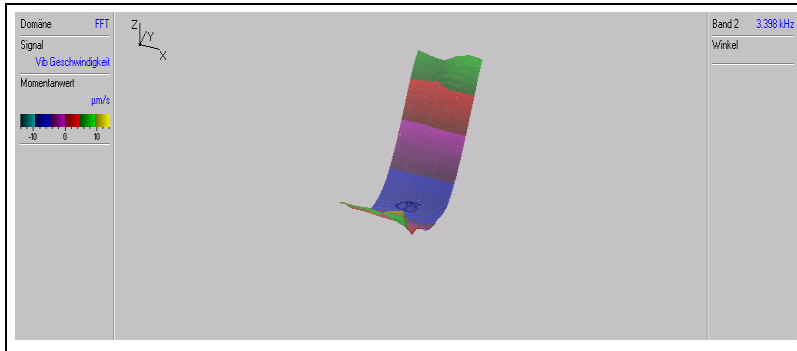


Bild 2.9: Momentaufnahme der Biegewelle, (Grundschiwingung),  $f_b = 3398$  Hz, (GrindoSonic: 3375 Hz)

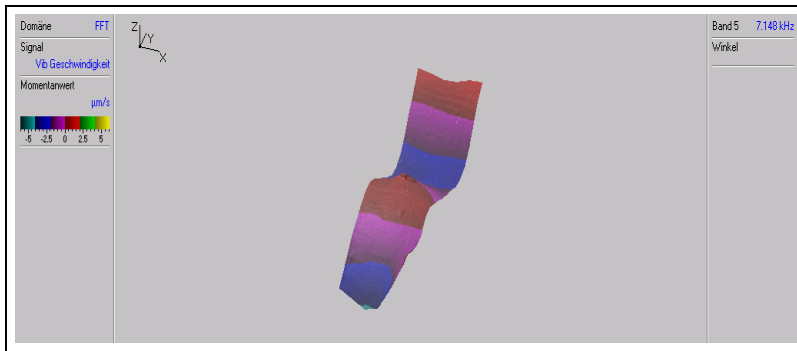


Bild 2.10: Momentaufnahme der Longitudinalwelle, mit Überlagerungen von Dehnwellenanteilen, (Grundschiwingung),  $f_l = 7148$  Hz, (GrindoSonic: 7156 Hz)

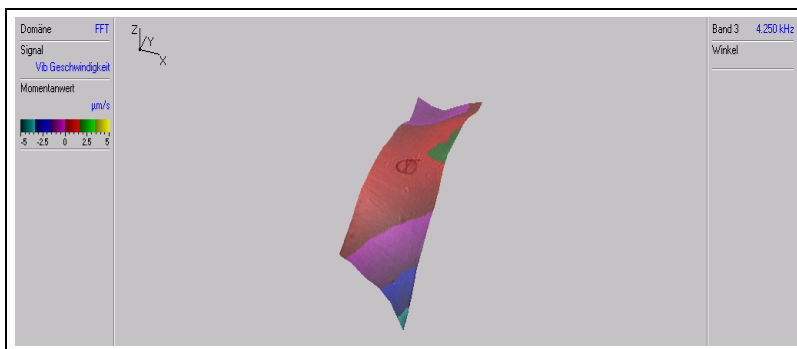


Bild 2.11: Momentaufnahme der Torsionswelle (Grundschiwingung),  $f_t = 4250$  Hz, (GrindoSonic: 4214 Hz)

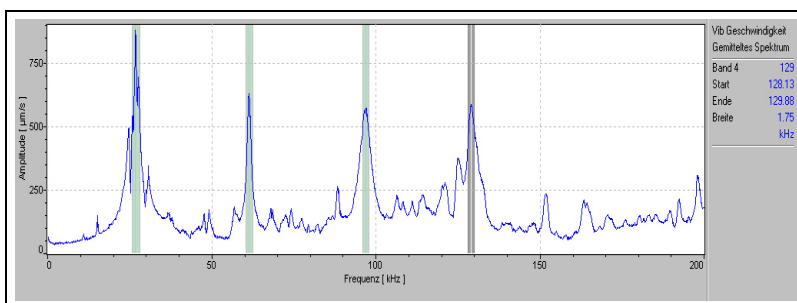


Bild 2.12: Frequenzspektrum des Schallgebers SW 30

Die dominierende Schallgeberfrequenz liegt mit der größten Wegamplitude (Bild 4.13) bei 26,7 kHz. Welche Wellenarten sich entsprechend der Verhältnisse  $s_q/\lambda_T$  und  $s_l/\lambda_L$

ausbilden, ist abhängig von den Frequenzen, die an der Schallübertragung teilnehmen und welcher aktuelle Gefügestand vorliegt. Es muß davon ausgegangen werden, daß Überlagerungen von Longitudinal- und Dehnwellenanteilen eintreten [36, 33] bzw. das Sonderformen der Transversalwellen entstehen.

#### ♦ Dämpfung

*Freie Schwingungen*, die sich im Anregungsfall der Klangprobe als stehende Welle ausbreiten, klingen durch Auftreten einer äußeren und einer inneren Dämpfung mit der Zeit ab. Die äußere Dämpfung wird verursacht durch Reibung mit der Luft in den Auflagepunkten sowie durch die meßtechnischen Bedingungen während der Bestimmung des Dämpfungsmaßes, ihre Darstellung soll im Kapitel 2.2. erfolgen. Die innere Dämpfung untergliedert sich in einen geometrie- und werkstoffbedingten Anteil, wobei der letztere den entscheidenden Einfluß ausübt. Er ist gekennzeichnet durch Abnahme der Schwingungsenergie durch Streuung an Inhomogenitäten, Absorption durch inelastische Prozesse und innerer Reibung [38, 26]. Es entstehen charakteristische

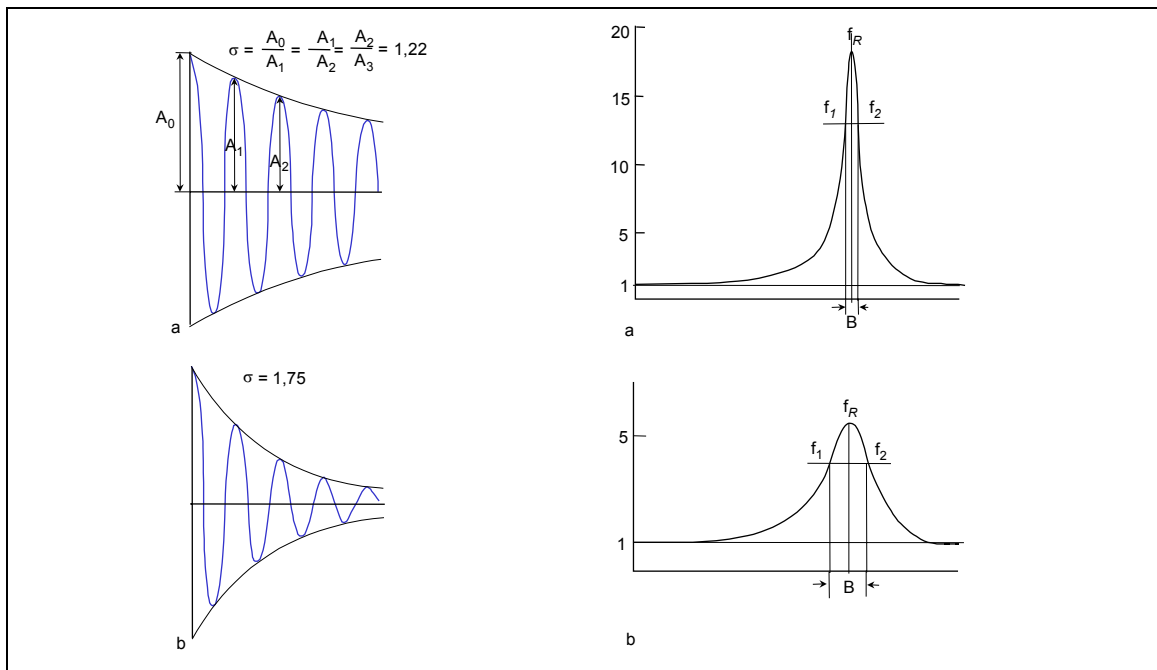


Bild 2.13: Auswirkung unterschiedlicher Dämpfungsfaktoren  $\delta$  auf die Bandbreite  $B$  der Resonanzkurve [26]

Abklingkurven, die mittels einer FFT analysiert und die Berechnung des Verlustfaktors  $\eta$  der inneren Dämpfung  $d$  nach Gleichung (2.2) aus der Bandbreite  $B$  (Halbwertsbreite) der Resonanzkurve in einer definierten Höhe ( $1/\sqrt{2} = 0,707$ ) erfolgt, Bild 2.13.

$$\eta = \frac{f_2 - f_1}{f_R} \quad (2.2)$$

Als Beispiel für unterschiedliche Dämpfungseigenschaften kann der Verlustfaktor von Stahl:  $1 \cdot 10^{-4}$  mit Stahlbeton B 35: 0,01 bis 0,06 verglichen werden [39]. Der in der AASHTO Designation TP 18 [42] beschriebene und von JANSSEN et al. [43] angewendete Qualitätsfaktor (Q-Faktor) ist der Kehrwert des Verlustfaktors  $\eta$  nach Gleichung (2.2). In Kapitel 5.1.7 wird der Q-Faktor zur Darstellung von Gefügeveränderungen benutzt.

Die eigentliche Dämpfung wird durch die Absorption von Schwingungsenergie, also durch ein Abbremsen der Masseteilchen durch Reibungsprozesse im Baustoffgefüge ausgelöst. Die innere Dämpfung des Baustoffgefüges wird durch Änderung der Feuchtigkeit und Porosität wesentlich beeinflusst. Dabei verbrauchen hohe Frequenzen mehr Schwingungsenergie und werden deshalb selektiv schneller gedämpft als niedrige. Dieser Vorgang kann gut in der jeweils charakteristischen Amplitudenverteilung und Ausbildungsform von Grund- und Oberwellen beobachtet werden [26], (Bild 5.26).

#### ♦ Verhalten von Wellen an Grenzflächen

In verschiedenen Medien breitet sich eine Welle unterschiedlich schnell aus. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit in einem Medium ist nach Gleichung (2.1) bei gleicher Frequenz von der Wellenlänge abhängig. Reale Körper haben innere (z.B. Porenwände im Beton) und äußere (z.B. Länge, Breite) Grenzflächen, die auf die Wellenausbreitung störend wirken. Die äußeren Grenzflächen beeinflussen die Ankopplung zur Schallübertragung, sie können ungewollte Randreflexionen auslösen oder zu einer gewollten Schallführung z.B. in Stäben führen [26]. Innere Grenzflächen zwischen unterschiedlich schalleitenden Medien können von einer senkrecht oder schräg einfallenden Schallwelle getroffen werden. Jede Abweichung von einer idealisierten geradlinigen Wellenausbreitung wird als *Beugung* bezeichnet.

Der senkrechte Einfall, Bild 2.14a, führt je nach Schallwellenwiderstand des angrenzenden Mediums zur teilweisen Reflexion und zum teilweisen Schalldurchgang. Zur Bewertung des reflektierten und übertragenen Anteils wird der Reflexions (R)- und Durchlässigkeitsfaktor (D) des Schalldruckes definiert. R und D gelten für Inhomogenitäten die  $\geq \lambda$  sind, Gleichung (2.3) und (2.4). Transversalwellen werden an Grenzflächen mit dem Übergang fest  $\rightarrow$  flüssig und fest  $\rightarrow$  gasförmig immer vollständig reflektiert [44].

$$R = \frac{p_r}{p_e} \quad (2.3)$$

$$D = \frac{p_d}{p_e} \quad (2.4)$$

Der schräge Einfall einer Schallwelle, Bild 2.14b, führt ebenfalls zu einer Aufspaltung in einen reflektierten und in einen durchgehenden Anteil. Der reflektierte Anteil kann in alle Raumrichtungen abgelenkt werden, die Richtungsänderungen (*Brechung*) des durchgehenden Anteiles werden durch das Brechungsgesetz definiert.

Ist die Reflexionsebene glatt, kann die Richtung der reflektierten Welle aus dem Reflexionsgesetz abgeleitet werden. Erfolgt die Reflexion an einer rauhen Grenzfläche, so setzt eine Reflexion von Wellenanteilen in unterschiedliche Richtungen ein (Streu-reflexion). In welchen Anteilen Streuung, Reflexion und Brechung einsetzen, hängt vom Verhältnis der Wellenlänge zur Größe der Störstelle ab. Streuung durch Beugung tritt an Inhomogenitäten auf, die  $> 1\%$  der Wellenlänge sind. Sie steigt mit der 3. Potenz des Durchmessers der Störstelle an. Erreichen die Inhomogenitäten die Größenordnung der Wellenlänge, so setzt Reflexion und Brechung ein [26, 35, 28, 44].

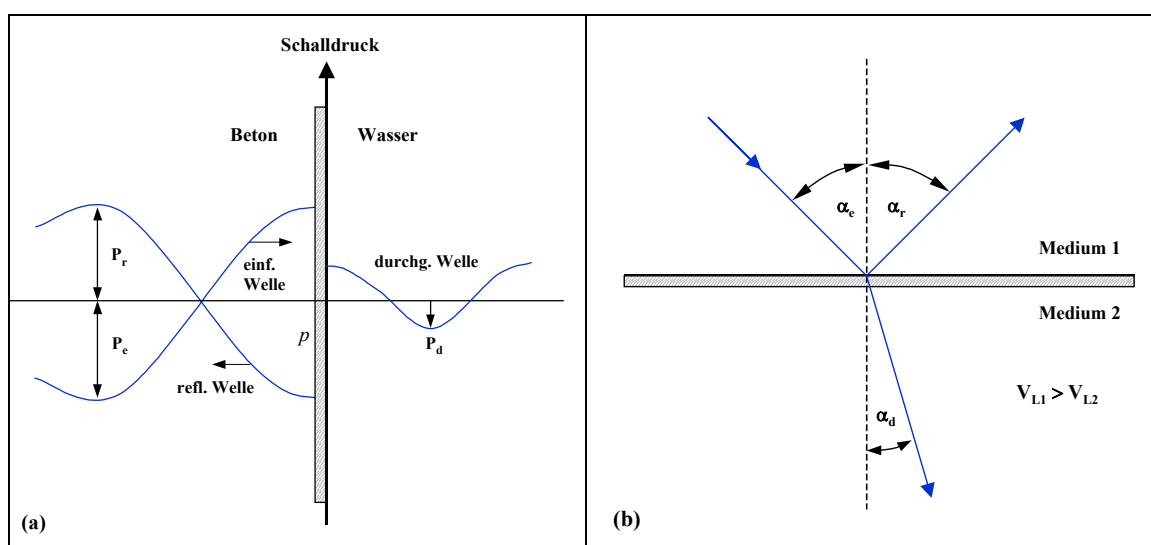


Bild 2.14: (a) Schalldruckwerte bei senkrechtem Einfall, (b) Reflexion und Brechung bei schrägem Einfall einer Schallwelle [26]

Mit Hilfes des Brechungsgesetzes ist es möglich, Wellenarten (Modenwandel [26]) ineinander umzuformen (siehe VOLKWEIN [45] Prüfung von Naturstein unter Wasser).

#### ◆ *Querdehnzahl und dynamischer Elastizitätsmodul*

Der Elastizitätsmodul (E-Modul) des Betons beschreibt den elastischen Verformungswiderstand (z.B. bei Druck- oder Zugbeanspruchung) und wird im einachsigen Spannungszustand durch das Verhältnis einwirkender Spannung zu zugehöriger elastischer Formänderung ausgedrückt [46, 47]. Es wird zwischen statischem ( $E_{\text{stat}}$ ) und dynamischem E-Modul ( $E_{\text{dyn}}$ ) unterschieden. Der statische E-Modul gibt den Verformungswiderstand gegen stetig zunehmende oder ruhende Belastung an. Er wird nach DIN 1048, Teil 5 [6] bei Druckbeanspruchung als Sekantenmodul zur  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Kennlinie definiert und wird zwischen den Grenzspannungen  $\sigma_{\text{min}} = 0,5 \text{ N/mm}^2$  und  $\sigma_{\text{max}} = 1/3 \beta_D$

ermittelt [48]. Der dynamische E-Modul beschreibt den Verformungswiderstand bei stoßartiger Belastung, die sich wellenförmig im Beton ausbreitet [47]. Er wird auch als Tangentenmodul der Ursprungstangente der  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Kennlinie beschrieben. Aufgrund der höheren Belastung der Betonstruktur und des Auftretens eines plastischen Verformungsanteiles ist der statische E-Modul kleiner als der dynamische E-Modul. Mit zunehmender Festigkeit nehmen die Unterschiede ab [49]. Nach [50, 35] stellt nur der dynamische E-Modul eine Materialkonstante dar, da seine Bestimmung nur von elastischen Verformungen begleitet ist. Der dynamische E-Modul wird wesentlich beeinflusst durch die Art des Zuschlages und des Zementsteines sowie durch das Alter, die Porosität und die Feuchtigkeit [46, 49, 51]. Aufgrund der leichteren Bestimmbarkeit des dynamischen E-Moduls wird die Frage zu den Abweichungen zwischen beiden Moduln gestellt. ROTH [52] leitet für den untersuchten Festigkeitsbereich von 200 bis 450 kp/cm<sup>2</sup> (19,6 bis 44,1 N/mm<sup>2</sup>) eine lineare Regression ab und stellt die Korrelationsbeziehung  $E_{\text{dyn}} = 166 + 0,674 E_{\text{stat}}$  [kp/cm<sup>2</sup>] mit einem Variationskoeffizienten  $V < 5 \%$  auf. Andere Literaturquellen verweisen auf um 5 % [50] bis 10 % [53, 54] höhere Werte des dynamischen E-Moduls für Beton im fortgeschrittenen Betonalter für übliche Lastbereiche.

NAGY [55, 56] korrigierte die höheren Werte des dynamischen E-Moduls gegenüber dem statischen E-Modul für Betone im Alter zwischen 0,2 bis 28 d durch Ermittlung eines Korrekturfaktors aus dem Verlustfaktor  $\eta$  der dynamisch gemessenen Biegeschwingung und leitet folgenden Zusammenhang ab:

$$E_{\text{stat}} = \frac{E_{\text{dyn}}}{1 + \eta^a} \quad (2.5)$$

$a$ : Faktor, der Zementart und w/z-Wert berücksichtigt (Versuchsbetone in [55]  $a = 0,35$ )

Die bei einachsiger Druckbeanspruchung auftretende elastische Stauchung führt in Querrichtung zwangsläufig zu einer elastischen Dehnung. Das Verhältnis beider Formänderungen wird durch die Querdehnzahl  $\mu$  ausgedrückt. Resultierend aus der Beanspruchung der Betonstruktur wird zwischen dynamische  $\mu_d$  und statische Querdehnzahl  $\mu_s$  unterschieden. In den weiteren Ausführungen sollen nur die Zusammenhänge zu  $\mu_d$  dargestellt werden. Ausführliche Erörterungen zu  $\mu_s$  sind z.B. AL-ABIDIEN [57] zu entnehmen. Aus  $E_{\text{dyn}}$  und  $\mu_d$  kann der Torsionsmodul  $G_{\text{dyn}}$  nach Gleichung (2.6) berechnet werden.

$$G_{\text{dyn}} = \frac{E_{\text{dyn}}}{2(1 + \mu_d)} \quad (2.6)$$

Die Gleichungen (2.7) bis (2.11) verdeutlichen die mathematischen Verknüpfungen der Schallgeschwindigkeiten  $v_L$ ,  $v_D$ ,  $v_T$ ,  $v_O$ , deren Entstehungsbedingungen an endlichen Körpern erläutert wurden, mit dem dynamischen Elastizitätsmodul  $E_{dyn}$ , der Rohdichte  $\rho_R$  und der dynamischen Querdehnzahl  $\mu_d$  [33, 26]:

$$v_L = \sqrt{\frac{E_{dyn}}{\rho_R} \frac{(1 - \mu_d)}{(1 - 2\mu_d)(1 + \mu_d)}} = \sqrt{\frac{E_{dyn}}{\rho_R} \frac{1}{k}} \quad (2.7)$$

Die Gleichung (2.7) umgestellt nach  $E_{dyn}$  lautet:

$$E_{dyn} = v_L^2 \rho_R k \quad \text{mit} \quad k = \frac{(1 - 2\mu_d)(1 + \mu_d)}{(1 - \mu_d)} \quad (2.8)$$

$$v_D = \sqrt{\frac{E_{dyn}}{\rho_R}} \quad (2.9)$$

$$v_T = \sqrt{\frac{E_{dyn}}{\rho_R} \frac{1}{2(1 + \mu_d)}} = \sqrt{\frac{G_{dyn}}{\rho_R}} \quad (2.10)$$

$$v_O = \frac{0,87 + 1,12\mu_d}{(1 - \mu_d)} v_T \quad (2.11)$$

Die dynamische Querdehnungszahl  $\mu_d$  ergibt sich aus dem Verhältnis von  $v_T / v_L$  und wird aus den Gleichungen (2.7) und (2.9) [35] berechnet:

$$\mu_d = \frac{1 - 2(v_T / v_L)^2}{2 - 2(v_T / v_L)^2} \quad (2.12)$$

Die Anwendung der Gleichung (2.12) beinhaltet die Problematik, daß die Bestimmung von  $v_T$  im Einzelfall möglich, jedoch für Serienmessungen z.B. zur Untersuchung von Frostschädigungen, die eine schnelle Meßabfolge erfordern, viel zu zeitaufwendig ist. Da über  $\mu_d$  die genannten Wellenarten mathematisch miteinander verknüpft sind, ist die

Berechnung von  $\mu_d$  auch aus dem Verhältnis zwischen anderen Wellenarten möglich. GROSSE [38] benutzt für die Durchführung seiner experimentellen Untersuchungen das Verhältnis  $v_O/v_L$ , um  $\mu_d$  zu berechnen. Im experimentellen Teil dieser Arbeit wird meßtechnisch das Verhältnis  $v_D/v_L$  benutzt,  $v_T$  wird indirekt berechnet. Diese Methode ist praktikabel und berücksichtigt den Sachverhalt von Randschädigungen, die durch einen Frostangriff entstehen (siehe Kapitel 2.2.1). Von RENTSCH und KROMPHOLZ, [40] werden die meßtechnischen Möglichkeiten zur Erfassung von  $v_L$ ,  $v_T$ ,  $v_{TL}$  und  $v_O$  für Labor- und Bauwerksuntersuchungen aufgezeigt, um  $\mu_d$  berechnen zu können. Der funktionale Zusammenhang der Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Wellenarten mit  $\mu_d$  wird in Nomogrammen dargestellt, im Bild 2.15 ist dieser am Beispiel  $v_T/v_L$  und  $v_D/v_L$  gezeigt.

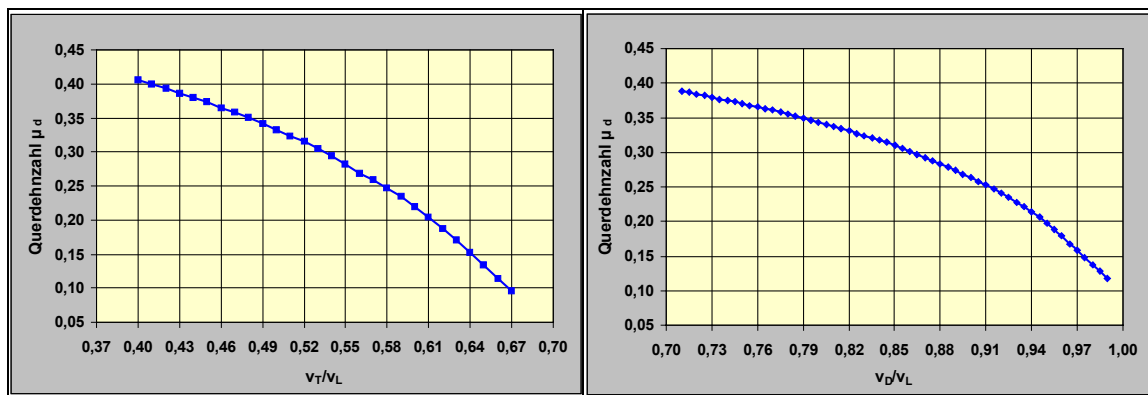


Bild 2.15: Querdehnzahl in Abhängigkeit von dem Verhältnis von  $v_T/v_L$  und  $v_D/v_L$  nach [36]

Die Forderung  $\mu_d$  genau zu berechnen, leitet sich aus Gleichung (2.7) ab. Die Auswirkungen, die durch ein geschätztes  $\mu_d$  bei der Berechnung von  $E_{dyn}$  auftreten können, werden in der Literatur unterschiedlich gewichtet. AL-ABIDIEN [57] berücksichtigt bei Beton Änderungen von  $\mu_d$  im Bereich von 0,10 bis 0,35. POHL [33] empfiehlt für ein Betonalter von 3 – 14 Tagen mit  $\mu_d = 0,3$  und für ein Betonalter von  $> 70$  d mit  $\mu_d = 0,15$  die Berechnung von  $E_{dyn}$  durchzuführen. STERNECK [53] berücksichtigt für Beton eine Schwankungsbreite für  $\mu_d$  von 0,22 – 0,27. Wird die maximale Änderung von  $\mu_d$  in Betracht gezogen, dann kann ein Berechnungsfehler für  $E_{dyn}$  von 30 - 35 % entstehen. Die Querdehnzahl mit  $\mu_s = 0,2$  darf nach [5, 49] zur Berechnung von  $E_{stat}$  ohne experimentelle Bestimmung angenommen werden.

Werden Resonanzschwingungen (stehende Wellen) in endlichen Körpern angeregt, so ist für Zylinder das Verhältnis von Radius  $r$  zur Gesamtlänge  $l$  bzw. für Prismen mit quadratischem Querschnitt  $a/2$  zur Gesamtlänge  $l$  entscheidend, welche Ordnung  $n$  von harmonischen Schwingungen angeregt werden kann. Die anregbare Ordnung der Oberwellen bei Prismen mit quadratischem Querschnitt ergibt sich nach Gleichung (2.13):

$$n \cdot \frac{1,175a}{2} \cdot \frac{1}{l} = 0,6 \quad \text{nach KNAKE et al. [58]} \quad (2.13)$$



Für die im experimentellen Teil dieser Arbeit verwendeten Prismen mit den Abmessungen  $80 \times 80 \times 250 \text{ mm}^3$  ist  $n = 3,19$  (Grundschiwingung  $n = 1$ ). Somit ist die Anregung bis zur 2. harmonischen Oberwelle möglich. Dies steht in Übereinstimmung mit den erzielten Versuchsergebnissen der untersuchten Betone im Ausgangszustand (vor Frostbeginn), siehe Bild 2.35 und Bild 5.26.

Die Verknüpfung zwischen den Geometrieigenschaften und  $\mu_d$  soll anhand der Gleichung (2.14) nach KOTTAS [37] zur Berechnung von  $E_D$  und Bild 2.15 verdeutlicht werden:

$$E_D = 4,002 \cdot 10^{-4} M_a f_d^2 m \frac{l}{a^2} \quad (2.14)$$

Aus Bild 2.16 ist ersichtlich, daß bei einem Verhältnis  $a/l < 0,3$  für den angegebenen Bereich der Querdehnzahl der Einfluß des Korrekturfaktors  $M_a < 1 \%$  beträgt.

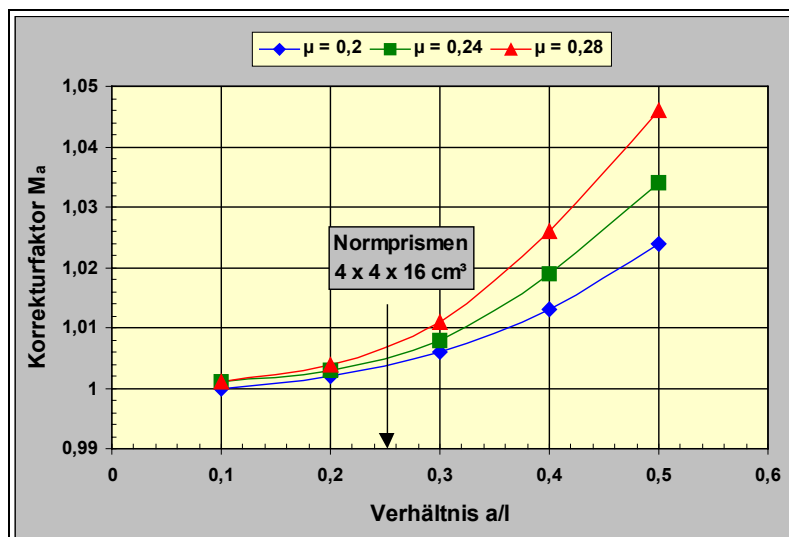


Bild 2.16: Abhängigkeit des Korrekturfaktors vom Verhältnis  $a/l$  für Körper mit quadratischem Querschnitt nach KOTTAS [37]

Wird nur  $f_d$  gemessen, so muß  $\mu_d$  zur weiteren Berechnung von  $E_D$  geschätzt werden, die Beeinflussung des Korrekturfaktors  $M_a$  ist dennoch gering. Der gleiche Wertebereich für  $\mu_d$ , entsprechend Bild 2.16 eingesetzt in Gleichung (2.8) würde für  $E_{dyn}$  aufgrund des Einflusses von  $k$  eine Änderung von 12 % bedeuten. Bild 2.17 verdeutlicht diesen Sachverhalt.

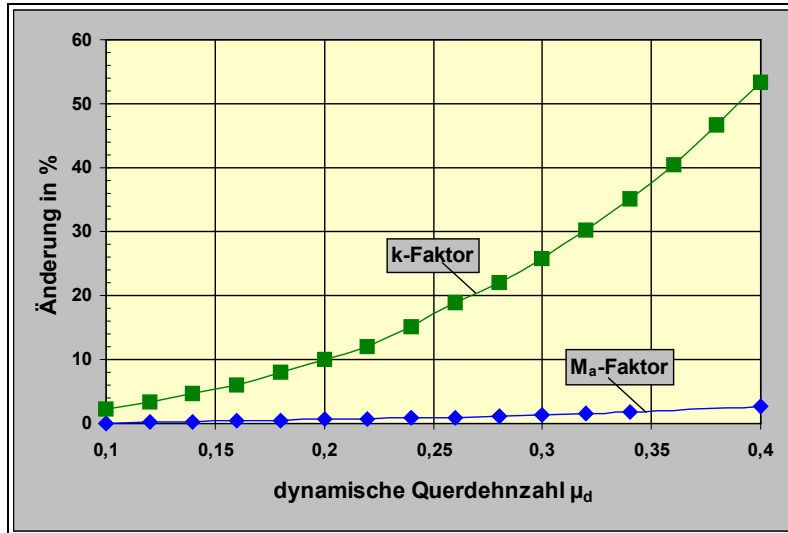


Bild 2.17: Änderung der Korrekturfaktoren  $k$  und  $M_a$  in Abhängigkeit von der Querdehnzahl  $\mu_d$ , das betrachtete Geometrieverhältnis  $a/l$  beträgt 0,3

Die Berechnungsgrundlagen für  $E_D$ ,  $E_B$  und  $G_T$  aus Resonanzfrequenzmessungen können vorzugsweise KOTTAS [37] entnommen werden, der auf der Basis der von MARINTCEK [59] erarbeiteten Geometriekoeffizienten eine übersichtliche Handhabung für die praktisch durchzuführenden Meßaufgaben geschaffen hat. Für Eigenschwingzeitmessungen nach Impulsanregung ist das Formelwerk nach POHL [33], SPINNER und TEFFT [60] sowie die Angaben im Regelwerk zur Berechnung von  $E_B$  und  $G_T$  nach ASTM C 1259-94 [61] zu beachten. Einen Gesamtüberblick zu den anzuwendenden Gleichungssystemen der Meßverfahren vermittelt BUNKE, DAfStb, Heft 422 [62] und Kapitel 2.2.3.

Die präzise Berechnung von  $\mu_d$  ist immer an die Bestimmung des Verhältnisses von zwei elastischen Kennwerten gebunden. Dies muß das Verhältnis von zwei Wellengeschwindigkeiten (z.B.  $v_T/v_L$ ) oder Resonanzfrequenzen verschiedener Eigenschwingungsformen (z.B.  $f_d/f_l$ ) sein. Auf die meßtechnischen Möglichkeiten wird im Kapitel 2.2 und 4 noch näher eingegangen. ASTM C 1259-94 sieht die Berechnung von  $\mu_d$  über eine Näherungsrechnung aus  $f_b$  und  $f_l$  vor. AL-ABIDIEN [57] vergleicht in seinen Recherchen zwei Berechnungsmethoden für  $\mu_d$ . Die 1. Methode beinhaltet die Messung von  $v_L$  und  $f_l$ . Die zweite Methode sieht die Bestimmung der Resonanzfrequenzen  $f_l$  und  $f_t$  vor.

#### ♦ Anwendung der akustischen Meßverfahren auf das Stoffsystem Beton

Die vorangegangenen Begriffsdefinitionen beziehen sich auf homogene, isotrope Körper, das heißt, alle physikalischen Eigenschaften können unabhängig von der Raumrichtung betrachtet werden. Für Untersuchungen in der Praxis können Betonprobestkörper selbst unter der Voraussetzung einer sachgerechten Herstellung (gleichmäßige Verdichtung, keine Entmischungen) im Ausgangszustand vor beginnenden Dauerhaftigkeitsuntersuchungen als quasihomogen und somit isotrop eingeordnet werden. Zur Beschreibung des elastischen Verhalten wäre die Bestimmung des dynamischen

Elastizitätsmodul und der Querdehnzahl als Materialkonstanten unter Angabe der Versuchsbedingungen ausreichend [33]. Gefügeveränderungen, die z.B. durch einen Feuchtegradienten oder einaxialen Frostangriff entstehen, heben diese Einordnung auf, so daß die ermittelten elastischen Kennwerte nur als Relativwerte die Änderungen im Gefüge zum Ausdruck bringen und nicht als Materialkonstanten betrachtet werden können.

### 2.1.3 Kontinuierliche Erfassung von Gefügeveränderungen während der Erhärtung von Beton

Kontinuierliche Schallgeschwindigkeitsmessungen werden mit der Zielstellung durchgeführt, dynamisch ablaufende Prozesse abzubilden. Diese beinhalten Veränderungen in der Dynamik des Abbindeprozesses und der Festigkeitsentwicklung von Zementleimen sowie Mörtel und Betonen unterschiedlicher Zusammensetzung. Sie kann durch Änderung der Temperatur, des w/z-Wertes, der Zementart, der Zuschlagart (Splitt oder Kies) oder durch Zugabe von Zusatzstoffen (Flugasche, Mikrosilica) bzw. Zusatzmitteln (Beschleuniger, Verzögerer) ausgelöst werden. Mit den Untersuchungsmöglichkeiten der Ultraschalltechnik werden für diese Themenkomplexe weitere, umfangreiche Anwendungen erschlossen. In den weiteren Ausführungen soll zunächst der Hydratationsverlauf von Portland- und Hochofenzement kurz beschrieben werden.

#### ◆ Portlandzement

Bei der Reaktion der vier Hauptklinkerminerale ( $C_3S$ ,  $\beta$ - $C_2S$ ,  $C_3A$ ,  $C_4AF$ ) mit Wasser in Gegenwart eines Sulfatträgers tritt in Abhängigkeit von der Reaktionszeit eine zunehmende Verfestigung ein. Dies bedeutet, daß ein flüssiges Medium in ein festes Medium umgewandelt wird. Die Verfestigungsvorgänge können in mehrere Teilprozesse untergliedert werden, in denen Hydrolyse- und Hydratationsvorgänge sowie Lösungs- und Kristallisationsvorgänge eine Rolle spielen [63]. Der zeitliche Verlauf der Zementhydratation kann nach STARK et al. [64, 65] in 5 Perioden untergliedert werden, Bild 2.18 verdeutlicht die gemessene Wärmeentwicklungsrate während der Hydratation bis 100 h und Bild 2.19 veranschaulicht die eingetretenen Phasenbildungen während einer Hydratationszeit von 24 h.

#### ➤ Anfangshydrolyse (Induktionsperiode):

Wenige Minuten nach Wasserzugabe setzt die chemische Reaktion des  $C_3A$  unter Mitwirkung des Sulfatträgers (Abbinderegler) ein, es entsteht Trisulfat (Ettringit). Die Zementpartikel werden mit einer dünnen Wasserschicht umhüllt. Aus dem  $C_3S$  wird  $Ca(OH)_2$  freigesetzt.

➤ *Ruheperiode (dormante Periode):*

Die chemische Reaktion des  $C_3A$  mit dem Sulfatträger kommt nach ca. 0,5 bis 2 h zum Erliegen, durch vereinzelte Keimbildung entstehen erste C-S-H-Phasen, es tritt Erstarrungsbeginn  $t_{EB}$  ein.

➤ *Beschleunigungsperiode (Accelerationsperiode):*

Im Verlauf dieser Periode nach 2 h entstehen durch schnell ablaufende chemische Reaktionen 200 bis 400 nm lange C-S-H-Fasern (entscheidend für Festigkeitsentwicklung im Zementstein) und dünnplattige Portlanditkristalle aus den Calciumsilicathydraten des Klinkers.

➤ *Verzögerungsperiode (Decelerationsperiode):*

Nach 11 bis 26 h klingt die Geschwindigkeit der chemischen Reaktion ab und es erfolgt gleichzeitig diffusionskontrolliert eine kontinuierliche Bildung von C-S-H-Faserbündel und plattigen Portlanditkristallen, die zunehmend verzahnen und verwachsen. Die im Anfangsstadium gebildeten kurzsäuligen prismatischen Ettringitkristalle wachsen in der Hauptwachstumsphase zwischen 12 und 24 h zu langfasrigen Kristallen und werden danach zum großen Teil in Monosulfat umgewandelt.

➤ *Stetige Periode (Finalperiode):*

Die Reaktionen verlaufen nach 26 h nur noch diffusionskontrolliert, ein weiteres Längenwachstum der C-S-H-Phasen führt zu einer kontinuierlichen Verdichtung des Zementsteingefüges.

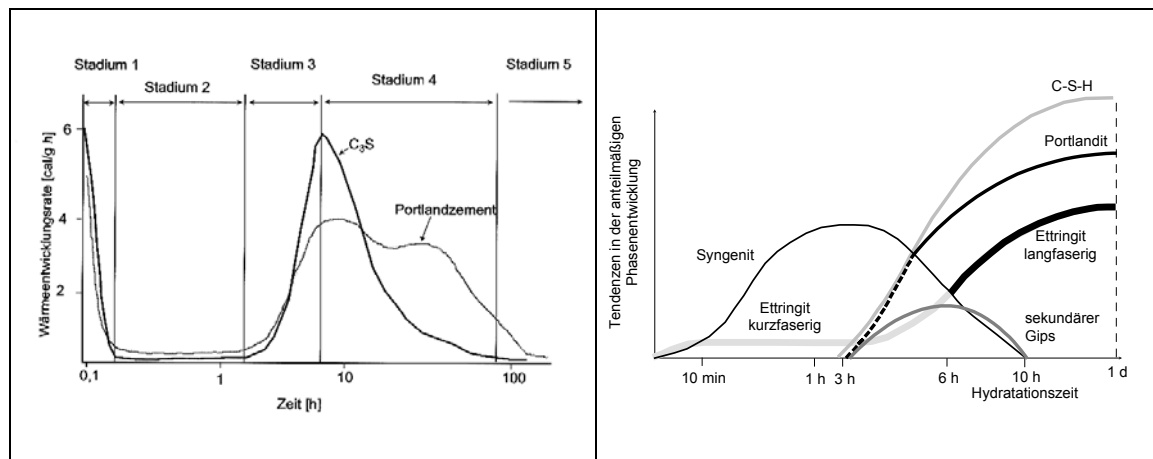
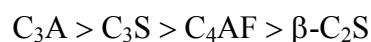


Bild 2.18: Reaktionsablauf und Hydratationsstadien des  $C_3S$  und des Portlandzementes [66]

Bild 2.19: Schematische Darstellung der Hydratphasenbildung bei der Zementhydratation [67]

Die Reaktionsgeschwindigkeit der Klinkerphasen verläuft in der Reihenfolge:



Sie wird von den Eigenschaften der Ausgangsstoffe (Mahlfeinheit, Kristallgröße, Kristallgrößenverteilung, Kristalldefekte) und den Hydratationsbedingungen (Temperatur, w/z-Wert, Energieeintrag beim Mischen, Verwendung von Zusatzmitteln) beeinflusst [63].

♦ *Hochofenzemente*

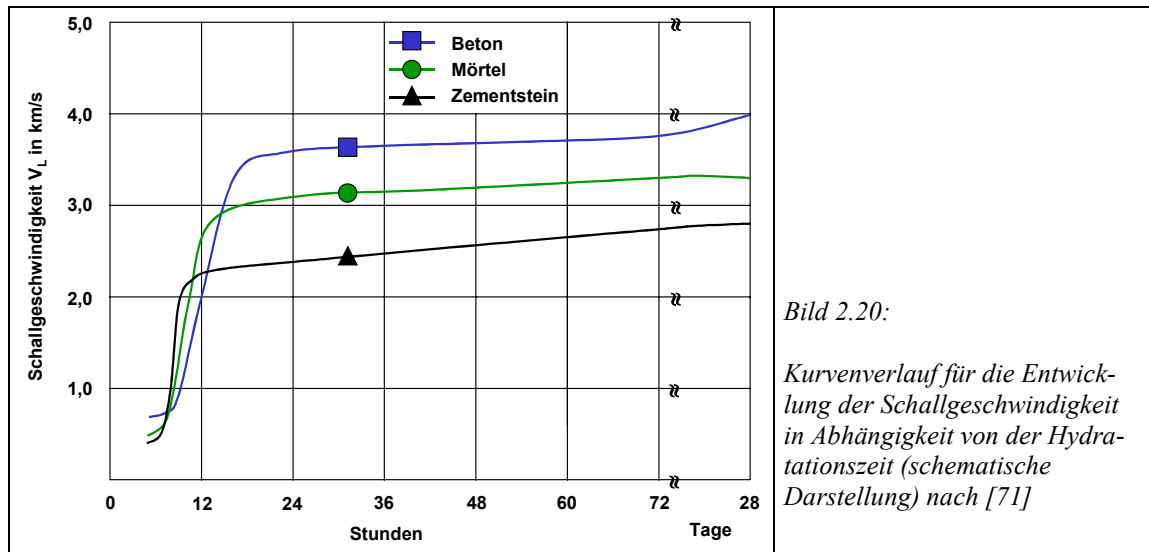
Die Hydratation der Hochofenzemente CEM III/A und CEM III/B verläuft mit geringerer Wärme- und langsamerer Festigkeitsentwicklung, jedoch bei Gewährleistung einer geeigneten Nachbehandlung mit hoher Nacherhärtung. Unterschiede im Verlauf der Hydratation gegenüber Portlandzementen resultieren aus der Induktionsperiode. Auf der Oberfläche der Hüttensandpartikel bildet sich nach Wasserzugabe eine dünne Schicht aus Calciumsilikathydraten, die einen sofortigen Übergang in die dormante Periode bewirken. Die erforderliche Anregung zum Fortgang der Hydratation erfolgt bei den genannten Zementen alkalisch durch den Portlandzementklinker. Der dadurch im weiteren Reaktionsverlauf ansteigende Gehalt an  $\text{Ca}^{2+}$ - und  $\text{OH}^-$ -Ionen führt zum Wiedereinsetzen der Hydratation des Hüttensandes. Die gebildeten Reaktionsprodukte der Hochofenzemente entsprechen im wesentlichen denen der Portlandzement-Hydratation, sie sind jedoch deutlich kalkärmer [63].

♦ *Abbindeprozeß, Erstarrungsverhalten*

Die meßtechnischen Möglichkeiten zur Beobachtung des Hydratationsverlaufes wurden in früheren Arbeiten auf die gut auswertbare Schalllaufzeit der Longitudinalwelle begrenzt, siehe z.B. [68, 69, 70].

Weitergehende Untersuchungen wurden von NEISECKE [35] zur Hydratation von Zementpasten durchgeführt. Zur Bewertung der Dynamik dieses Prozesses wurde die Schallimpulsintensität  $J$ , die Schallgeschwindigkeit  $v_L$  und  $v_T$  gemessen und  $\mu_d$  berechnet. Damit war es erstmals möglich, eine geschlossene Darstellung des elastischen Verhaltens der während der Hydratation entstehenden kristallinen Strukturen (Feststoffskelett) zu geben. Die gemessene Schallimpulsintensität wurde als wenig aussagekräftig eingeschätzt.

Charakteristische Kurvenverläufe für die Entwicklung der Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Hydratationszeit für Beton, Mörtel und Zementstein ergeben sich aus den Untersuchungen von OECKNICK [71], Bild 2.20.



Aus den Kurvenverläufen in Bild 2.20 werden nach [71] drei Perioden in der Entwicklung der Schallgeschwindigkeit  $v_L$  abgeleitet:

➤ 1. Periode

Auch als Frühstadium der Erhärtung bezeichnet, erstreckt sich die 1. Periode über einen Zeitraum bis ca. 24 Stunden. Sie ist gekennzeichnet von einem steilen Anstieg der Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Rezeptur und der Reaktivität der Zementklinker. Die Wendepunkte im jeweiligen Kurvenverlauf liegen bei den durchgeführten Untersuchungen nach 4 – 7 Stunden (Beginn des Anstieges durch Aufbau des Feststoffskeletts) und nach 11 – 18 Stunden (Ende des steilen Anstieges, Übergang in einen abgeflachten Hydratationsverlauf).

➤ 2. Periode

Der Zeitraum von 24 bis 72 Stunden nach dem Anmachen ist geprägt von einem stetigen Verlauf der Schallgeschwindigkeit mit geringen Zuwachsraten. Es kristallisiert sich nach dem 2. Wendepunkt im Kurvenverlauf der Einfluß der Rezeptur heraus. Je höher der Volumenanteil des Zuschlages ist, desto stärker wirken sich die höheren Schallgeschwindigkeiten und die niedrigeren Porositäten der Zuschläge gegenüber einem gleichen Volumenanteil Zementstein durch höhere Maxima aus.

➤ 3. Periode

Ein weiterer Anstieg der Schallgeschwindigkeit im Zeitraum vom 3. bis zum 28. Tag nach dem Anmachen ist nur noch beim Beton zu beobachten. Zementstein und Mörtel haben nach ca. 14 Tagen ihren Maximalwert der Schallgeschwindigkeit erreicht, der weitere Kurvenverlauf ist nahezu konstant.

Änderungen der akustischen Leitfähigkeit werden entscheidend vom w/z-Wert (Anteil Kapillarporosität), und der Reaktivität (Mahlfeinheit, Korngrößenverteilung, Zementart) des Zementes verursacht.

Zur Beurteilung der in jüngster Zeit durchgeführten Arbeiten zu kontinuierlichen Messungen des Hydratationsverlaufes können die Arbeiten von ROSTASY [72], GROSSE [38] und JONAS [44] herangezogen werden.

ROSTASY [72] bestimmte auf der Basis der gemessenen Schallgeschwindigkeit  $v_L$  und des von PAULINI und GRATL [73] aufgenommenen Kurvenverlaufes für  $\mu_d$  während der Hydratation sowie einer als konstant angenommenen Rohdichte den Verlauf des dynamischen E-Modules während der Steifigkeitsentwicklung von jungem Beton. Untersuchungen zum Einfluß des Zementes und des w/z-Wertes auf die Entwicklung von  $E_{dyn}$  standen im Vordergrund. Als Fazit der Untersuchungen wird die direkte Bestimmung des Hydratationsgrades  $\alpha_0$  (Ende des Ruhestadiums) als Beginn der Hydratation mit dem Aufbau erster Feststoffeigenschaften aus den Meßkurven ablesbar. Der in früheren Untersuchungen durch Extrapolation berechnete Wert von  $\alpha_0$  durch punktuell gewonnene mechanische Kennwerte weicht von dem mit Ultraschall bestimmten Wert  $\alpha_0$  erheblich ab. Auf die Umrechnung von  $E_{dyn}$  in  $E_{stat}$  nach Gleichung (2.5) wird verwiesen mit  $E_{stat} \approx 0,74 E_{dyn}$ .

Die Untersuchungen von GROSSE [38] konzentrierten sich auf Frischbeton, der hinsichtlich w/z-Wert, Zusatz von Verzögerungsmitteln und Zementart (CEM I, CEM III) variiert wurde. Ausgewertet wurde  $v_L$ , die Amplitudendämpfung und der Frequenzgehalt der übertragenen Schallwellen. Im Ergebnis der Versuche konnte festgestellt werden, daß Änderungen von  $v_L$  gut mit der rezepturbedingten Schalleitung des Betons korrelieren, während die Meßergebnisse zur Amplitudendämpfung aufgrund schwankender Ankopplungsbedingungen einen großen Meßfehler aufweisen und nur vergleichende Betrachtungen zwischen den Rezepturen (qualitative Aussagen) ermöglichten. Die Auswertung des gesamten Frequenzgehaltes der übertragenen Welle mittels Frequenzanalyse während der Erhärtung des Frischbetons ergab mit zunehmender Versuchsdauer einen Anstieg des Gehaltes an hohen Frequenzen sowie die Vergrößerung der Bandbreite des übertragenen Spektrums. Nach 26 h Erhärtungszeit konnten Signale im Frequenzbereich zwischen 40 und 120 kHz aufgezeichnet werden. Die Bestimmung der Amplitudenhöhe erwies sich trotz der Ankoppelproblematik als eine empfindlichere Methode, als die der Bestimmung von  $v_L$ .

JONAS [74, 44, 75] bewertete die Anwendungsmöglichkeiten der Frequenzanalyse zur Bestimmung der Erstarrungszeiten von Bindemitteln (Zement, Gips) sowie Beton und verglich die ermittelten Werte vom Erstarrungsbeginn ( $t_{EB}$ ) und Erstarrungsende ( $t_{EE}$ ) mit konventionellen Prüfverfahren. Als Basis für Zementpasten wurde die DIN EN 196/Teil 3 [76] herangezogen, für Beton erfolgte aufgrund fehlenden Regelwerkes die Konsistenzprüfung nach bestimmten Zeitabständen nach DIN 1048/Teil 1 [77]. Die Darstellung der Gefügeveränderungen während des Abbindens der untersuchten Rezepturen erfolgte durch Messung der Amplitudenhöhe in 15 jeweils 20 kHz breiten Frequenzbändern. Die Anwendung der Ultraschall-Frequenzanalyse führte bei den untersuchten Bindemitteln und Betonen zur sicheren Bestimmung von  $t_{EB}$  und  $t_{EE}$ . Bei Zementpasten stimmen diese mit den Ergebnissen der genormten Prüfverfahren überein,

bei Betonen entsprechen die ermittelten Erstarrungszeiten dem Ansteifungsverhalten der zugehörigen Zementleimmischungen. Die zu verschiedenen Zeiten ermittelten Ausbreitmaße waren nicht aussagefähig.

RÖSCH [78] untersuchte den Zusammenhang zwischen dynamischen Kennwerten und Druckfestigkeit durch Anwendung der Eigenschwingzeitmessung und des EQUO-Verfahrens (Mikrohärteprüfverfahren zur Bestimmung des Quotienten aus Rückprall- und Aufprallgeschwindigkeit). Präpariert wurden Normprismen mit Zuschlägen bis 8 mm Größtkorn unter Verwendung von CEM I und CEM III. Der exponentielle Zusammenhang zwischen dynamischem E- und G-Modul wird bestätigt.

♦ *Festigkeitsentwicklung, Erhärtungsdruckfestigkeit*

In Abhängigkeit von der Reaktivität des Zementes (z.B. Mahlfeinheit) und den Hydrationsbedingungen (z.B. w/z-Wert) entsteht eine bestimmte Struktur des Zementsteines, welche die mechanischen Eigenschaften (z.B. Druckfestigkeit), die Dichtigkeit (Kapillarporosität) und somit die Dauerhaftigkeit maßgebend beeinflussen [48, 63]. Im vorangegangenen Abschnitt konnte erläutert werden, daß Änderungen in der Verfestigung des Zementsteines sich in der gemessenen Ultraschalllaufzeit, der Amplitudenhöhe des Ersteinsatzes der Longitudinalwelle und im Frequenzgehalt der übertragenen Schallwelle widerspiegeln. Dieser funktionale Zusammenhang wird auch nicht aufgehoben, wenn der Zementleim entsprechend dem Mischungsentwurf mit einem wesentlich höheren Volumenanteil Zuschlag (Sand, Kies, Splitt) vermengt wird. Die Schalleitung in diesen komplexen Stoffsystemen (Mörtel, Beton) wird jedoch dann von der akustischen Leitfähigkeit der Zuschläge dominierend beeinflusst. Akustische Widerstände (Schwachstellen im Sinne der Festigkeit) stellen die Kontaktstellen zwischen Zementstein und Zuschlagoberfläche dar, die aufgrund geringerer Konzentrationen des Zementgels grobporiger, porenreicher und durch Mikrorisse (vor)geschädigt sein können, siehe Bild 2.21a [48, 79, 8]. Im Vergleich dazu eine ungestörte Mikrostruktur zwischen Zuschlag und Zementstein, Bild 2.21b.

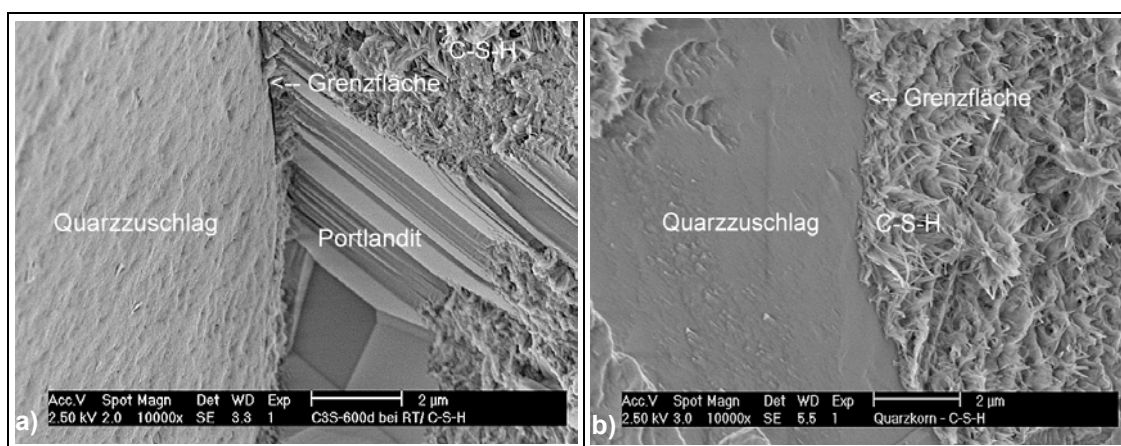


Bild 2.21: Ausbildung der Phasengrenzfläche an einem Zuschlagkorn (ESEM-Aufnahme): a) schlechter Haftverbund im Bereich der vorzugsorientierten, hexagonal-tafeligen Portlanditkristalle, b) guter Haftverbund im Bereich der aufgewachsenen C-S-H-Phasen [80, 63]



Die Mikrostruktur der Phasengrenzfläche zwischen Zuschlag und Zementstein wird durch die Bildung von vorzugsorientierten Portlandit-Kristallen verschlechtert, die unabhängig von der Zuschlagart einsetzt. Nach GRANDÉT und OLLIVIER [81] nimmt die Dicke dieser Zone mit steigendem w/z-Wert zu. Durch die Oberflächenbeschaffenheit der Zuschläge (z.B. Dichtigkeit, Rauigkeit) kann eine Verbesserung der Mikrostruktur (dichter, homogener) und ein mechanisches Verhaken zwischen Zuschlag und Zementstein bewirkt werden [63].

Hieraus leiten sich auch die Probleme ab, aus einer gemessenen Schallgeschwindigkeit auf einen zugehörigen Festigkeitswert zu schließen. Die Betondruckfestigkeit wird aufgrund der hohen Eigenfestigkeit der Zuschläge ausschließlich von der schwächsten Stelle in der Struktur des Zementsteines und vom Haftverbund zwischen Zementstein und Zuschlag geprägt. Die Schalllaufzeit kann als Mittelwert der akustischen Leitfähigkeit im zurückgelegten Schallweg verstanden werden, die aufgrund des hohen Volumenanteils des Zuschlags von deren elastischen Eigenschaften entscheidend abhängt [82, 41]. Die in der Vergangenheit empirisch aufgestellten Exponentialfunktionen zur Beschreibung des funktionellen Zusammenhanges zwischen Schallgeschwindigkeit und Druckfestigkeit können in allgemeiner Form durch Gleichung (2.15) ausgedrückt werden [82, 41, 83, 84]:

$$\beta_D = ae^{bx} \quad (2.15)$$

- $a$  : rezepturbedingter Koeffizient (z.B. Zementart, Zementmenge, Zusatzstoffe)
- $b$  : Koeffizient, der die Erhärtingsbedingungen berücksichtigt
- $x$  : elastischer Kennwert (z.B. gemessene Schallgeschwindigkeit  $v_L$ )

Da die Aufstellung derartiger Korrelationsbeziehungen sehr aufwendig ist, werden sie in der Regel nur in großtechnischen Fertigungsbereichen im Rahmen der Qualitätssicherung angewendet.

Um an Betonbauwerken zerstörungsfrei die Schwankungsbreite der Festigkeit abschätzen zu können, wird die Vorgehensweise empfohlen [68, 85, 62, 78], daß durch orientierende Ultraschallmessungen die Spannweite von  $v_L$  ermittelt wird. Eine gezielte Bohrkernentnahme in den unterschiedlichen Schallgeschwindigkeitsbereichen soll zur Aufstellung der statistischen Beziehung zwischen  $v_L$  und  $\beta_D$  dienen. Diese kann auch an Rückstellprobekörpern (Würfel), die gleiche Rezeptur und Erhärtingsbedingungen aufweisen oder an der Bausubstanz entnommenen Bohrkernen nach JONES und FACAOARU mit der Anzahl  $n > 30$  [86] und nach TGL 33437/02 [87] erstellt werden. Der ermittelte funktionale Zusammenhang ist nur für den konkreten Anwendungsfall gültig. Hinweise für eine kombinierte Prüfung z.B. Rückprallhammer und Ultraschall können [88, 41, 89] entnommen werden. Das deutsche Regelwerk sieht nach DIN 1048/Teil 2 [90] und Teil 4 [91] als zerstörungsfreies Prüfverfahren die Anwendung des

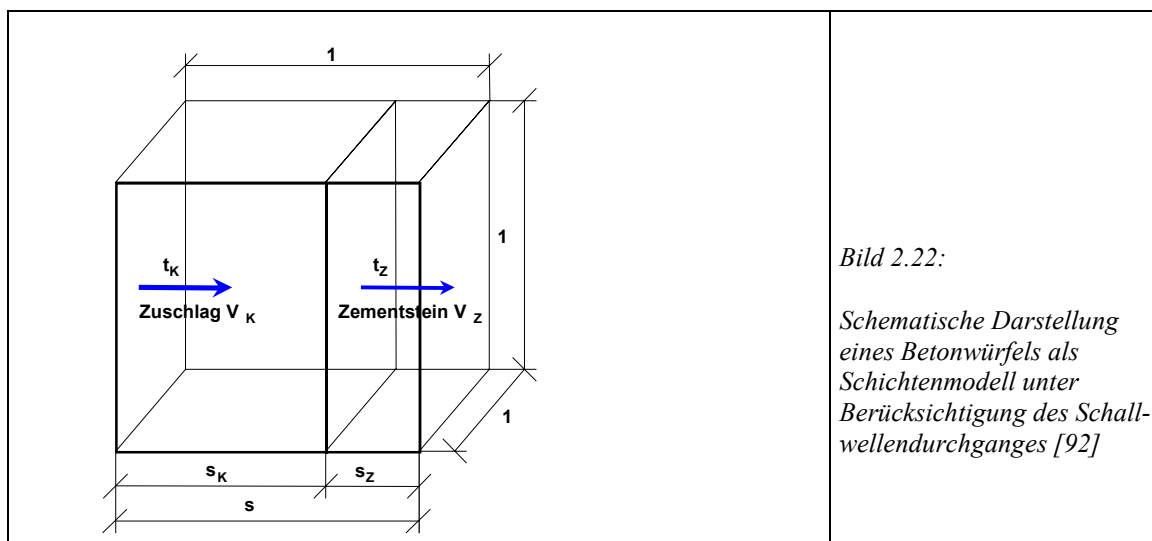
Rückprallhammers mit Erstellung einer Bezugsgeraden zwischen zerstörend und zerstörungsfrei ermittelten Druckfestigkeiten vor, wobei die einschränkenden Hinweise zur Anwendung der Bezugsgeraden zu beachten sind.

KÄßNER et al. [92] entwickelten ein Strukturmodell, Bild 2.22, um zementspezifische Struktur-Festigkeitsbeziehungen ableiten zu können [93]. Das Strukturmodell beinhaltet, daß die Schallwelle im Schalldurchgang im erhärteten Beton unterschiedliche Weganteile im Zementstein  $s_Z$  und im Zuschlag  $s_K$  zurücklegt und daß diese Weganteile den relativen Volumenanteilen des Zementsteins  $V_Z$  und Zuschlags  $V_K$ , berechnet aus dem Mischungsentwurf der Rezeptur, entsprechen. Es wird weiterhin angenommen, daß sich die Schalllaufzeiten  $t_Z$  und  $t_K$  der zugehörigen Wegstrecken  $s_Z$  und  $s_K$  addieren, Gleichung (2.16):

$$v_B = \frac{s_B}{t_B} ; \text{ mit } v_K = \frac{s_K}{t_K} \text{ und } v_Z = \frac{s_Z}{t_Z} ; s_B = s_K + s_Z \text{ und } t_B = t_K + t_Z \quad (2.16)$$

Durch Messung von  $v_B$  und der Kenntnis von  $v_K$  wird die Schallgeschwindigkeit  $v_Z$  des Zementsteins unter Einbeziehung der Gleichung (2.16) und der definierten Randbedingungen zu  $v_K$ ,  $v_Z$ ,  $s_B$  und  $t_B$  nach Gleichung (2.17) [92] berechnet:

$$v_Z = \frac{s_Z \cdot v_B \cdot v_K}{v_K(s_Z + s_K) - v_B \cdot s_K} \quad (2.17)$$



Die kontinuierliche Erfassung der elastischen Kenngröße  $v_Z$  beschreibt den erreichten Hydratationsgrad des untersuchten Zementes in Abhängigkeit von der Zeit und der Temperatur. Die Gelporosität wird bei der Bewertung der Zementsteinstruktur-Festigkeitsbeziehung der Feststoffkonzentration (Gelkonzentration) zugeordnet. Der zunehmende Einfluß der entstehenden Kapillarporen bei w/z-Werten  $> 0,4$  führt bei Wassersättigung und verstärkt bei Austrocknung zu Dichteunterschieden im Zementstein, die durch  $v_Z$  erfaßt werden. Durch die Rezeptur wird der aktuelle w/z-Wert in Verbindung mit dem ermittelten Frischbetonporenraum der Betonmischung berücksichtigt.

Folgende Hypothesen wurden zum Nachweis der Modellvorstellungen entworfen:

- Zur Aufstellung einer Volumenbilanz wird das ursprüngliche Volumen von Wasser und Zement entsprechend der Betonrezeptur auch während der Zementhydratation als unverändert betrachtet [93].
- Die Zementsteinmatrix erreicht bei einer Zementsorte bei gleichen Druckfestigkeiten gleiche Ultraschallgeschwindigkeiten  $v_Z$  unabhängig vom w/z-Wert und der Zuschlagstoffsieblinie [92, 94].
- $v_Z$  ist bei gleicher Druckfestigkeit der Zementsteinmatrix unabhängig von der Erhärtungszeit und der Erhärtungstemperatur [92, 94].
- Die Zuschläge liefern einen rezepturabhängigen Geschwindigkeitsbeitrag, der jedoch die Festigkeit und somit die Zementsteinstruktur nicht beeinflusst. Es wird vorgeschlagen,  $v_K$  mit einer konstanten Schallgeschwindigkeit von 5,0 km/s in Gleichung (2.17) einzusetzen.

Durch die Modellierung bleiben folgende Einflußfaktoren unberücksichtigt:

- Die Mikrostruktur der Phasengrenzflächen zwischen Zuschlag und Zementstein, siehe Bild 2.21 [63].
- Volumenänderungen der Ausgangsstoffe Zement und Wasser während der Hydratation bedingt durch das chemische Schwinden.
- Änderungen im Hydratationsverlauf in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen (wechselnde Feuchte) und der Verwendung latenthdraulischer Zusatzstoffe, wie z.B. Hüttensand oder puzzolanischer Zusatzstoffe, wie z.B. Flugasche.

Die Korrelationsbeziehung zwischen  $v_Z$  des Zementsteines und der Druckfestigkeit  $R$  wird nach [92] gemäß Gleichung (2.18) wie folgt angegeben:

$$R = A \cdot \left( \frac{v_B}{v_0} \right)^B \quad \text{wird } v_Z \text{ aus } v_B \text{ berechnet: } R = A \cdot \left( \frac{v_Z}{v_0} \right)^B \quad (2.18)$$

$R$  : Druckfestigkeit

$A, B$  : empirische Konstanten

$v_0$  : Bezugsgeschwindigkeit ( $v_0 = 1 \text{ km/s}$ )

Die Korrelation zwischen zerstörungsfrei  $\beta_{D(US)}$  und zerstörend  $\beta_{D(W)}$  gemessener Druckfestigkeit und der berechneten Standardabweichung  $s$  wird nach [95] wie folgt angegeben:

$$\beta_{D(W)}(cal) = -0,15 + 0,97 \cdot \beta(US) \text{ mit } s = 1,20 + 0,04 \cdot \beta(US) \quad (2.19)$$

Die meßtechnischen Voraussetzungen zur genauen Erfassung des Hydratationsverlaufs von Normalbeton bietet das Meßgerät CONSONIC 60 von der Firma GEOTRON. Das Meßgerät wurde konzipiert, um eine kontinuierliche und diskontinuierliche Erfassung der Erhärtungsdruckfestigkeit im Bereich der Frühfestigkeit von Beton durchzuführen. Die Anwendbarkeit des Meßgerätes in Verbindung mit dem erörterten Strukturmodell zur Messung der Erhärtungsdruckfestigkeit von Normalbeton wird im experimentellen Teil dieser Arbeit unter Kapitel 5.2 diskutiert, siehe auch KÄßNER in [96, 97].

GROSSE stellt in [98] ein kontinuierlich arbeitendes Ultraschallmeßverfahren zur Frischbetonanalyse vor. Erfäßt werden die bereits genannten elastischen Kenngrößen ( $v_L$ ,  $\eta$  und Frequenzgehalt), um den Einfluß geänderter Materialparameter der Betonrezeptur, wie w/z-Wert, Zementart und Zusatzmittel darzustellen. In [99] wird versucht, durch Anwendung von calorimetrischen Messungen, der Raster-Elektronen-Mikroskopie (REM) und der Kernresonanzspektroskopie (NMR) den mit Schallgeschwindigkeitsmessungen ermittelten Kurvenverlauf der Hydratation zu verifizieren. Calorimetrische Messungen bestätigen den Kurvenverlauf, jedoch wird durch den Sensor nur ein zu geringes Probenvolumen erfaßt. REM-Untersuchungen verfälschen aufgrund der Probenpräparation die Versuchsergebnisse, in diesem Zusammenhang wird auf die Notwendigkeit von ESEM-Untersuchungen hingewiesen. NMR führt zur mathematischen Verifizierung der mit Schallgeschwindigkeitsmessungen ermittelten Kurvenverläufe. Sie ist jedoch gegenüber der einfachen Durchführung von Schalldurchgangsmessungen aufwendig in der Probenpräparation und in ihrer Anwendung auf Zementpasten beschränkt.

## 2.2 Meßtechnische Grundlagen

Die Ausbreitung von mechanischen Schwingungen in Verbindung mit der Bestimmung der charakteristischen Meßgrößen der Meßverfahren soll im Kapitel 2.2 im Einzelnen diskutiert werden. Das Bild 2.23 soll einen Überblick zu den akustischen Meßverfahren vermitteln, die je nach den Erfordernissen der Prüfaufgabe zur Bewertung von Gefügeveränderungen oder zur Erfassung von Strukturunterschieden angewendet werden können.

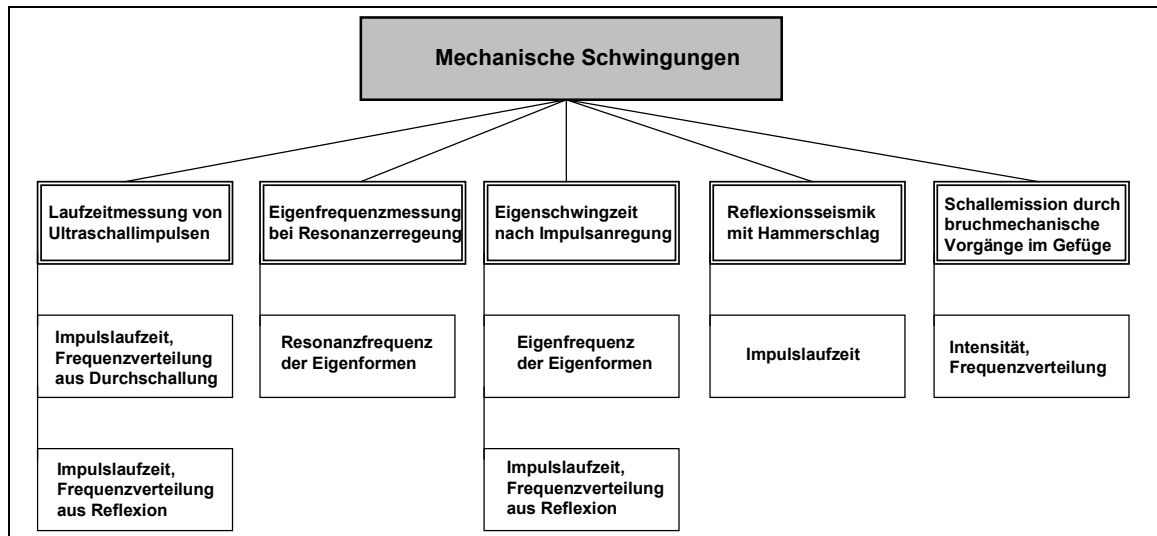


Bild 2.23: Übersicht der akustischen Meßverfahren, deren Basis die Anregung von mechanischen Schwingungen darstellt [26, 100]

Auf die Beschreibung der Reflexionsverfahren und der Schallemmission soll in dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden. Hier sei auf die Grundlagenliteratur, wie KRAUTKRÄMER und KRAUTKRÄMER [26] verwiesen sowie auszugsweise auf Veröffentlichungen der letzten Jahre z. B. zum Impuls-Echo-Verfahren [101, 102, 103, 104, 105, 106], zum Impact-Echo-Verfahren [107, 108, 109, 110, 104] sowie zum Schallemmissionsverfahren [38, 109, 111, 112].

### 2.2.1 Laufzeitmessung von Ultraschallimpulsen

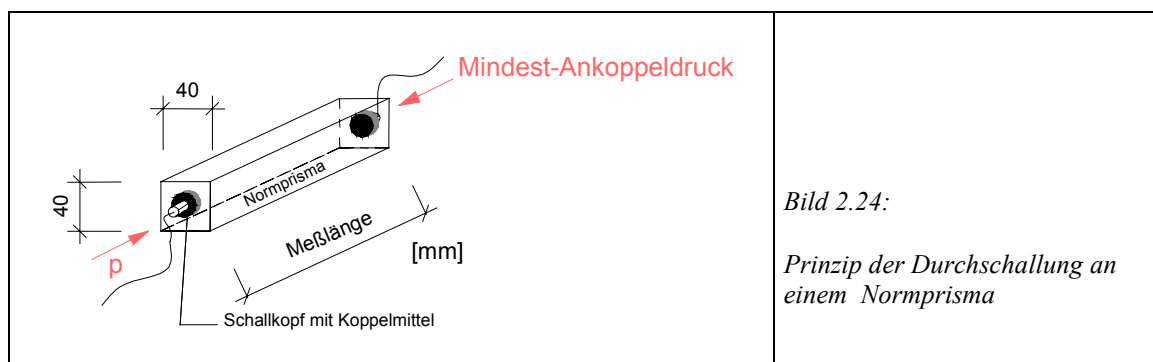
Die Durchführung des Ultraschallverfahrens zur Bestimmung der Impulslaufzeit erfolgt in Deutschland nach prDIN EN 13296 [113] und nach den Empfehlungen des DAfStb, Heft 422 [62] sowie RILEM Recommendation NDT 1 [114]. In den USA wird ASTM C 597 [115] und in England der British Standard 4408 [116] verwendet.

Die Anfänge des Ultraschallverfahrens liegen im Jahre 1929, als SOKOLOV die Anwendung des Schattenverfahrens mit kontinuierlichen Schallwellen zur Feststellung von Materialfehlern vorschlug. MÜHLHÄUSER erhielt 1931 das erste Patent für ein Meßgerät, welches das Schattenverfahren anwendete. Die ersten Untersuchungen an Betonbalken wurden von MEYER und BOCK im Jahr 1938/39 durchgeführt [26]. Der Stand der nach dem 2. Weltkrieg einsetzenden Entwicklungsaktivitäten bis zum Jahre 1970 auf dem Gebiet der Impulslaufzeit-, Impulsecho- und Dämpfungsmessung an Beton wurden von REHM et al. in [89] zusammengestellt. Eine Fortführung der Literaturrecherchen bis 1989 wurde von TEODORU [41] erstellt. Weitere Entwicklungsschritte werden in [75] aufgezeigt. Sie sind geprägt von ständig erweiterten Möglichkeiten der Computertechnik zur Signaldigitalisierung und Signalanalyse für eine tiefer gehende Auswertung des Informationsgehaltes (Frequenzanalyse) der aufgezeichneten Ultraschallsignale, z.B. JONAS [213], GROBE [38] und von einer gerätetechnischen Entwicklung zur Lösung spezieller Prüfaufgaben, wie die Erfassung des Hydratations-

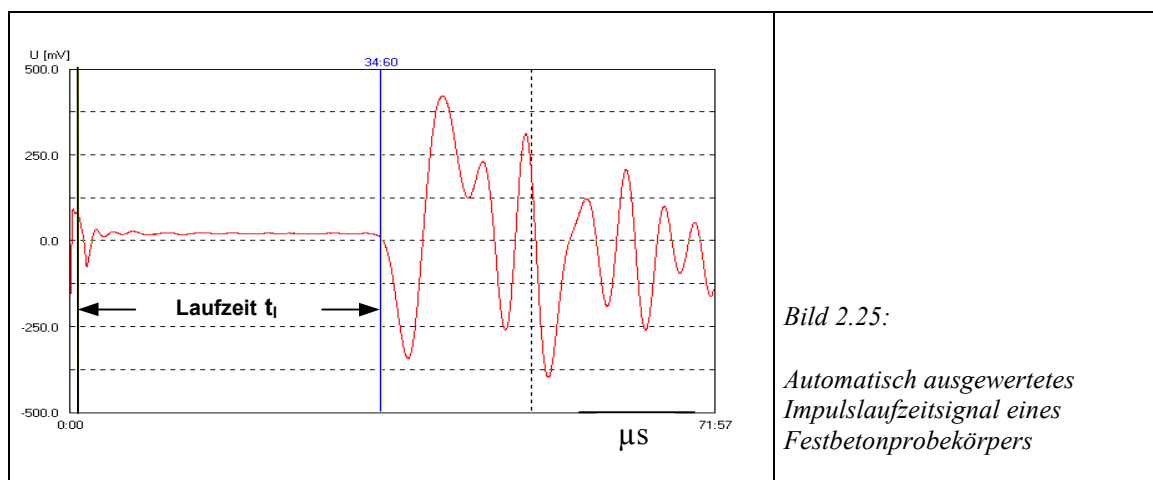
verlaufes in Beton durch kontinuierliche Schallgeschwindigkeitsmessungen [96, 117, 98]. Eine ausführliche Zusammenstellung der auf diesem Gebiet durchgeführten Arbeiten zum Abbindeverhalten von Zementpasten und Beton wurde von JONAS [44] erstellt. Die ersten Arbeiten zur Ultraschalltomographie stammen von GREENLEAF und Mitarbeiter aus dem Jahre 1974 [26].

#### ◆ Impulslaufzeitmessung aus Durchschallung

Zur Impulslaufzeitmessung (Prinzipdarstellung Bild 2.24) wird ein Ultraschallimpuls durch das Meßobjekt gesendet und die Schallaufzeit der Longitudinalwelle oder einer anderen auswertbaren Wellenart aus der Verzögerung des Empfangssignales (Cursor 2, Bild 2.25 ) gegenüber dem Beginn des Sendeimpulses (Cursor 1, Bild 2.25 ) ermittelt.



Ein Korrekturwert (Verzögerungszeit) für die Laufzeit des Meßsystemes wird mit einem Referenznormal ermittelt (Nullmessung) und vom Meßwert subtrahiert (siehe auch Kapitel 4.3) [113, 118]. Um die Übertragung des Schalldruckes bei unterschiedlichen Oberflächenrauigkeiten möglichst verlustarm zu ermöglichen, muß ein geeignetes Ankoppelmittel verwendet werden.



Die Berechnung der Schallgeschwindigkeit erfolgt aus dem gemessenen Schallweg (Meßlänge) und der dazugehörigen Schalllaufzeit nach Gleichung (2.20):

$$v_L = \frac{s}{t_l} \quad (2.20)$$

Nach DIN EN 13296 [113] ist der Schallweg mit einer Genauigkeit von  $\pm 1 \%$  und die Laufzeit mit  $\pm 0,1 \mu\text{s}$  zu bestimmen. Festlegungen zur Aussteuerung der Erstamplitude und der Bestimmung des Ersteinsatzes (Stellung Cursor 2) der Longitudinalwelle existieren im deutschen Regelwerk nicht.

Durch die verwendeten Elemente der Meßkette werden in Abhängigkeit von der verwendeten Schallgeberart Schallwellen mit einem unterschiedlichen Frequenzgehalt erzeugt. Es entstehen unterschiedliche Dämpfungsanteile, die den Frequenzgehalt der übertragenen Schallwelle und somit den Wert der Impulslaufzeit, die Flankensteilheit und die Höhe der Erstamplitude des P-Welleneinsatzes beeinflussen. Vorrangigen Einfluß haben die Abstrahlcharakteristik der verwendeten Schallgeber, siehe Kapitel 4.1, die Frequenzfilterwirkung der Baustoffprobe und die Ankoppelbedingungen (Ankoppeldruck, Ankoppelmittel) während des Meßvorganges [118].

Die für die Durchführung der jeweiligen Prüfaufgabe optimalen Sendefrequenzen können nur nach Verfügbarkeit der Schallgeber in bestimmten Grenzen angepaßt werden. Nach DIN EN 13296 [113] soll die Eigenfrequenz der verwendeten Schallgeber für Betonuntersuchungen im Frequenzbereich zwischen 20 bis 150 kHz liegen, wobei für kurze Weglängen bis 50 mm die Anwendung von Hochfrequenzschwingern (60 bis 200 kHz) und für lange Weglängen bis 15 m Niederfrequenzschwinger (10 bis 40 kHz) empfohlen werden.

Der „Frequenzfilter Baustoffgefüge“ kann nicht beeinflußt werden und ist Gegenstand der Untersuchungen. Der Einfluß des Ankoppeldrucks auf die Impulslaufzeit kann im Labor durch Verwendung geeigneter Vorrichtung nahezu eliminiert werden, ein Ausschließen der Beeinflussung der Höhe der Erstamplitude ist jedoch bei einer mechanischen Ankopplung nicht zu erreichen (siehe Kapitel 4.2).

Die mechanische Ankopplung kann ohne (trocken) oder mit Ankoppelmittel ausgeführt werden, sie führt auf jeden Fall zum höchsten meßtechnisch bedingten Energieverlust. Die trockene Ankopplung (Verwendung von Tastspitzen) bietet den Vorteil einer schnellen Meßdurchführung sowie einer von der Feuchtigkeit unbeeinflussten Signalerfassung an der Meßstelle. Dieser Fakt ist vor allem bei Probekörpern mit kurzen Schallwegen wichtig. Die übertragene Schallintensität ist geringer und die Signaldämpfung wird stark von der Oberflächenrauigkeit des Betons beeinflußt [119]. Die Verwendung von Ankoppelmitteln (Verwendung von Flächenschallköpfen) setzt voraus, daß diese eine gleichbleibende Konsistenz (z.B. Ton) aufweisen, damit in Verbindung mit dem

erforderlichen Ankoppeldruck ein möglichst konstanter Energieverlust der Schallwelle erreicht wird. Auf eine weitere technische Möglichkeit, Schallwellen auf einen Probekörper zu übertragen, wurde im Kapitel 2.1.2 unter dem Stichwort „Modenwandel“ [45] hingewiesen. SETZER und AUBERG entwickelten zur Erfassung von Gefügeschädigungen, die während der Prüfung des Frostwiderstandes entstehen, den CIF-Test [120]. Dieser Test sieht vor, daß die Übertragung der Schallwellen über eine definierte Wasservorlaufstrecke, die zwischen Schallwandler und der Oberfläche des Probekörpers eingestellt wird, erfolgt (Bild 2.26). Das Ankoppelmedium besteht in diesem Fall aus der Prüflösung (demineralisiertes Wasser), die für die Prüfung des Frostwiderstandes verwendet wird.

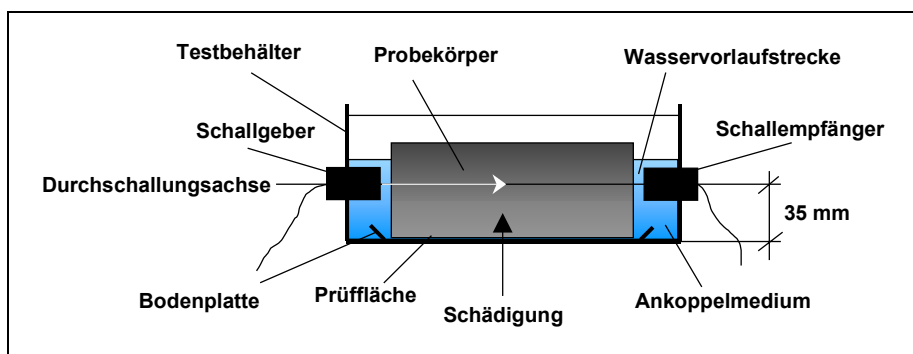


Bild 2.26: Schematische Darstellung des CIF-Testes

Als Kenngröße der inneren Schädigung wird der relative dynamische E-Modul ermittelt, der aus der Änderung der gemessenen Impulslaufzeiten vor und nach der Prüfung des Frostwiderstandes ermittelt wird. Dabei bleiben Änderungen der Rohdichte und der Querdehnzahl unberücksichtigt. Zum Messen wird der Probekörper in das Ankoppelmedium getaucht und direkt durchschallt. Die Durchschallungsachse (Mittelpunkt des Schallgebers) hat parallel zur Abwitterungsfläche (Prüffläche) einen Abstand von 35 mm. An jedem Probekörper wird in zwei senkrecht zueinander stehenden Durchschallungsachsen die Impulslaufzeit gemessen. Mit der Lage der Durchschallungsachse ist der Bereich definiert, in dem die Schädigung des Betongefüges ermittelt wird (siehe Kapitel 5.1). Die Berechnung des relativen dynamischen E-Moduls erfolgt nach Gleichung (2.21):

$$\Delta E_{dyn,n} = \left[ 1 - \left( \frac{t_{tcs} - t_c}{t_{t,nftc} - t_c} \right)^2 \right] \cdot 100 \quad (2.21)$$

- $\Delta E_{dyn,n}$  : Änderung des relativen dynamischen E-Moduls  
 $n$  : Anzahl der Frost-Tau-Wechsel  
 $t_{tcs}$  : Gesamtlaufzeit nach dem kapillaren Saugen (cs)  
 $t_{t,nftc}$  : Gesamtlaufzeit nach n Frost-Tau-Wechseln (ftc)  
 $t_c$  : Laufzeit im Ankoppelmedium



Um für Impulslaufzeitmessungen eine vergleichbare Aussteuerung der Erstamplitude zu erreichen, wäre für Einzelmessungen eine stufenlose manuelle Einstellung der Signalvorverstärkung bzw. bei automatischer Signalkonditionierung für kurze Meßintervalle eine automatische Einstellung eines gleichbleibenden Schalldruckpegels erforderlich. Sinnvoll ist auch der Einsatz von A/D-Wandlerkarten mit einer höheren Amplitudenauflösung (z.B. 12 Bit A/D-Wandlerkarten). Handelsübliche Transientenrecorder erlauben nur die Einstellung von vorgegebenen Meßbereichen, so daß aufgrund der Frequenzabhängigkeit des P-Welleneinsatzes geringe Laufzeitverschiebungen akzeptiert werden müssen, siehe Kapitel 4.4.

Zur Bestimmung des Ersteinsatzes der Longitudinalwelle können unterschiedliche Methoden angewendet werden. Bei der Durchführung von Impulslaufzeitmessungen an Laborserien ist die Bestimmung des Ersteinsatzes der P-Welle manuell möglich durch Vorgabe eines Schwellwert-Kriteriums, wodurch der Beginn des P-Welleneinsatzes als konstanter Differenzbetrag zu den mittleren oder zur maximalen Änderung der Nulllinie (Signal-Rausch-Verhältnis) festgelegt wird. Kontinuierliche Laufzeitmessungen zum Hydratationsverlauf oder zur Durchführung von tomographischen Untersuchungen, bei denen in der Regel eine hohe Datendichte entsteht, erfordern eine automatische Erkennung des P-Welleneinsatzes (Laufzeitpicking). Die erforderliche Signalkonditionierung (zeitliche Mittlung) muß durch geeignete Frequenzfilter und Signalstapelung erreicht werden [121, 122]. Aber nur wenn das Signalrauschen unterhalb oder oberhalb der Hauptfrequenzen des Signales liegt, kann eine Hoch- bzw. Tiefpaßfilterung angewendet werden [123].

Je nach Prüfaufgabe besteht die Notwendigkeit, die Lage einer Durchschallungsachse (A-Scan), die Rasterung entlang einer Linie (B-Scan) oder die Fläche für eine bestimmte Anzahl von Meßpunkten (C-Scan) zu definieren. Die ermittelten Meßgrößen pro Meßpunkt können Laufzeit, Amplitude und Frequenzverteilung sein. Werden Tiefenprofile erstellt, so entsteht eine 3D-Seismik (D-Scan). Die Klammerangaben beinhalten die jeweiligen geophysikalischen Bezeichnungen [26, 38].

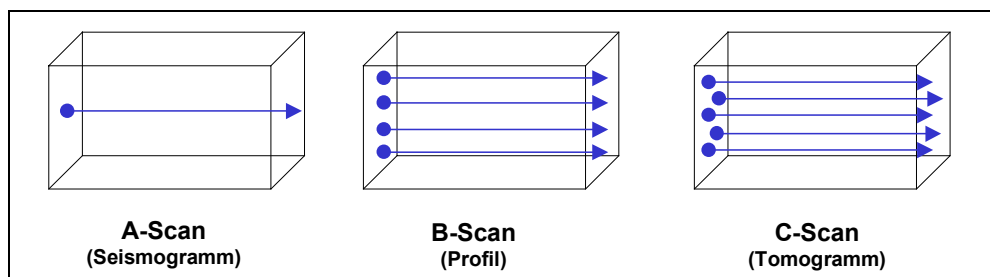
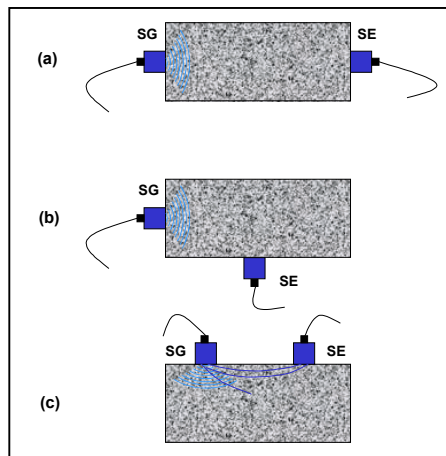


Bild 2.27: Scan-Varianten der Ultraschalltechnik [26, 38]

Die Impulslaufzeitmessung wird nach DIN EN 13296 [113] untergliedert in die direkte, halbindirekte und indirekte Ankopplung, Bild 2.28.



Die direkte Ankopplung ist die am häufigsten angewandte Meßmethode und setzt die zwei-seitige Zugänglichkeit von Untersuchungsflächen voraus. Die indirekte Ankopplung erfordert die Bestimmung des Epizentralabstandes zwischen den Schallwandlern. Sie kann zur Bestimmung von  $v_L$  und  $v_O$  im oberflächennahen Bereich angewendet werden.  $v_O$  wird nach der Peak-and-through Methode bestimmt [38].

Bild 2.28: Schwingeranordnung für (a) direkte, (b) halbindirekte und (c) indirekte Ankopplung

Im Bild 2.29 wird die Ankopplung mit Hilfe einer Vorrichtung mit einstellbarem Ankoppeldruck für eine S-Wellenmessung dargestellt. Bild 2.30 zeigt das Datenflußschema zur prinzipiellen Durchführung von Impulslaufzeitmessungen am Beispiel einer P- und S-Wellenmessung. Bild 2.31 beinhaltet das digitalisierte Zeitsignal eigener Untersuchungen für die durchgeführte P- und S-Wellenmessung an einem Zylinder aus Hochfesten Beton mit dem Ergebnis  $v_L = 4902 \text{ m/s}$ ,  $v_T = 2879 \text{ m/s}$  und  $\mu_d = 0,236$ , berechnet nach Gleichung (2.12). Nach RENTSCH und KROMPHOLZ [39] wird der Einsatz der Transversalwelle als erste Unstetigkeit im gleichmäßigen Verlauf der Longitudinalwelle definiert. In der Praxis erfolgt die Identifizierung des S-Welleneinsatzes (Bild 2.31) durch die Näherung  $v_T \approx 0,6 v_L$ , so daß eine dynamische Querdehnzahl von  $\mu_d \approx 0,22$  in diese Näherungsberechnung einbezogen wird.

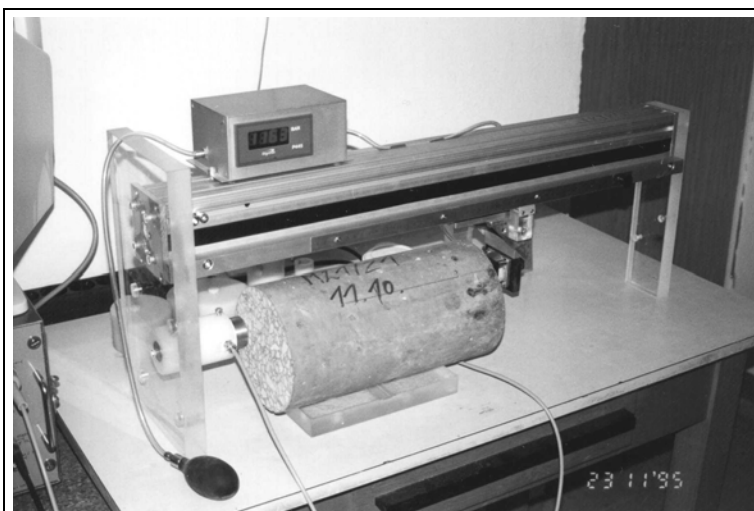


Bild 2.29:

P- und S- Wellenmessung an einem Betonzyylinder der Abmessungen  $\varnothing 150 \times 300 \text{ mm}^3$

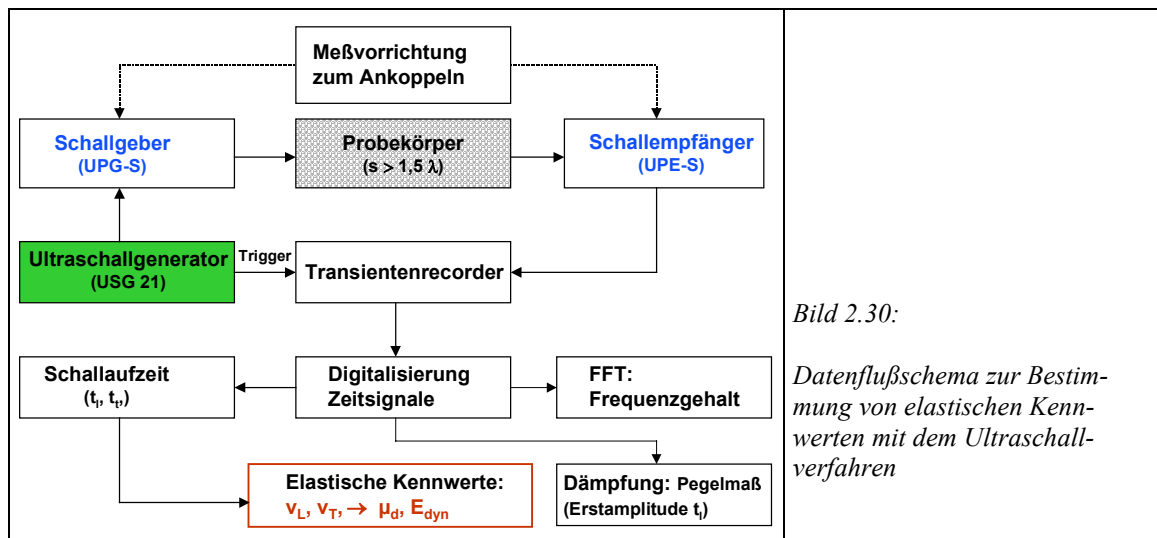


Bild 2.30:

Datenflußschema zur Bestimmung von elastischen Kennwerten mit dem Ultraschallverfahren

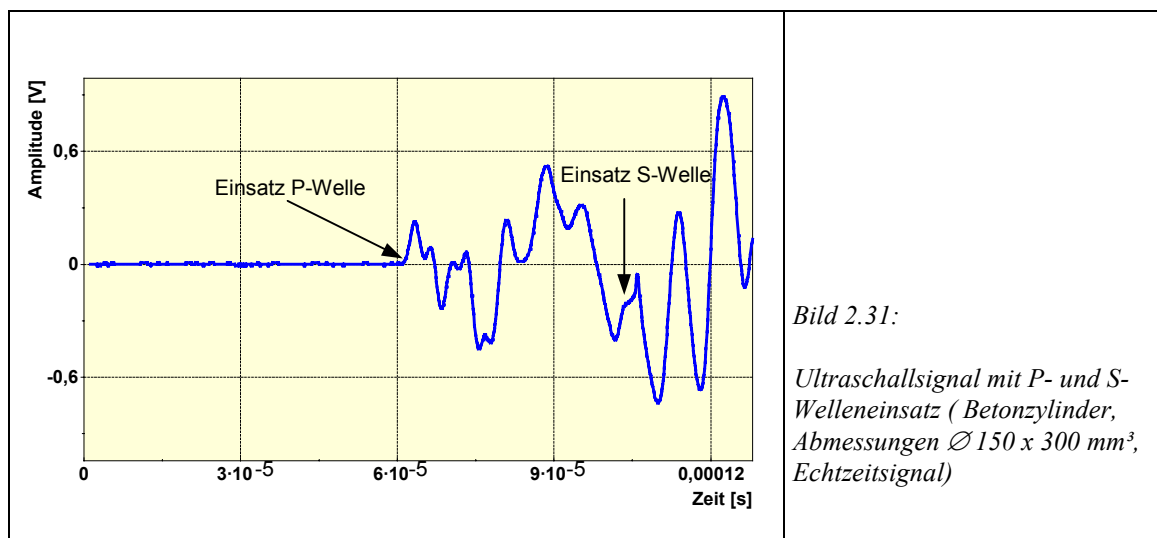


Bild 2.31:

Ultraschallsignal mit P- und S-Welleneinsatz (Betonzylinder, Abmessungen  $\varnothing 150 \times 300 \text{ mm}^3$ , Echtzeitsignal)

Der P-Welleneinsatz im Bild 2.31 hat aufgrund der Bauart der verwendeten Scherwellenwandler einen positiven Anstieg der ersten Flanke.

#### ◆ Ankopplung und Dämpfungsmessungen

Wird *Ultraschall* zur Durchführung von Dämpfungsmessungen verwendet, so hat auf die praktische Durchführung und auf die Reproduzierbarkeit des ermittelten Dämpfungsmaßes (z.B. Pegelmaß) die mechanische Ankopplung der Schwingungsaufnehmer entscheidenden Einfluß. Die mechanische Ankopplung wird aufgrund schwankender Rauigkeit der Betonoberfläche und zur Realisierung der erforderlichen Intensität oft unter Verwendung von Flächenschallköpfen mit geeigneten Ankopplmitteln durchgeführt. Hierzu wurden in der Vergangenheit umfangreiche Untersuchungen durchgeführt (siehe NEISECKE [35]; WESCHE [124]), um geeignete Ankopplmittel zu finden. Eine starre Ankopplung, z.B. mit Zuckerlösung [35] oder Gips ist zur Durchführung von stationären Untersuchungen im Labor für Langzeit-

messungen gut geeignet. Serienmessungen im Labor erfordern jedoch Ankoppelmittel, die nach Art und Konsistenz gleichbleibende Eigenschaften behalten, so daß unter Einhaltung eines Mindestankoppeldruckes gleiche Schichtdicken erzeugt werden können. JONAS [44] ermittelte einen Mindestwert für den Ankoppeldruck von 0,09 N/mm<sup>2</sup>, TEODORU [41] gibt 0,3 N/mm<sup>2</sup> an, ab dem der Amplitudenwert des P-Welleneinsatzes sich unabhängig vom Ankoppeldruck ändert. NEISECKE [35] entwickelte spezielle Prüfköpfe, die über im Prüfkopf vorhandene Flüssigkeiten (z.B. Terpentinöl) ankoppeln.

Die Ultraschalltechnik verwendet zur Darstellung der Schallschwächung das Amplitudenverhältnis zwischen den Schalldrücken  $p_0$  und  $p$ . Diese leiten sich aus dem exponentiellen Schalldruckverlauf einer ebenen Welle ab, der nur durch Schwächung abnimmt, wobei  $p_0$  und  $p$  die Schalldrücke zu Anfang und Ende einer Strecke  $d$  mit dem Schwächungskoeffizient  $\alpha$  nach Gleichung (2.22) sind [26]:

$$p = p_0 e^{-\alpha d} \quad (2.22)$$

Die Darstellung von  $\alpha'$  ( $\alpha' = \alpha \cdot 8,6$ ) wird vorzugsweise in dB/m, auf der Basis des dekadischen Logarithmus vorgenommen und wird nach Gleichung (2.23) berechnet [26]:

$$\alpha' d = 20^{10} \log \frac{p_0}{p} \quad (2.23)$$

Eine weitere Methode zur Bestimmung der Schallschwächung ist die Anwendung der Rise Time Technik nach GLADWIN und STACEY [125]. Eine unterschiedliche Materialdämpfung führt zu unterschiedlich langen Anstiegszeiten der Vorderflanke der Erstamplitude. Diese Methode wird analog der Messung der Schalldruckamplitude von der mechanischen Ankopplung beeinflusst.

Die im Zusammenhang mit der Ultraschallmessung diskutierte geometriebedingte Dämpfung entsteht dadurch, daß die sich von der Schallquelle ausbreitenden Kugeln mit zunehmendem Abstand von der Schallquelle auf größere Raumbereiche verteilen und dadurch die hochfrequenten Schwingungsanteile stärker gedämpft werden als die niedrigen, so daß eine Verschiebung des P-Welleneinsatzes die Folge ist. Sie ist für Laboruntersuchungen nicht relevant, da die Abmessungen der Probekörper in der Regel konstant sind und die Schallwege mit  $< 1$  m nach [33] in einem unkritischen Bereich liegen.

Eigene Untersuchungen zur geometriebedingten Dämpfung, die an einem industriell gefertigten Betonunterzug der Abmessungen 11,5 x 12 x 210 cm<sup>3</sup> durchgeführt wurden,

ergaben nach Längsdurchschallung von 210 cm, ( $v_L = 4152 \pm 9,8$  m/s), sowie der Teillängen des Unterzuges von 104 cm, 52 cm und 25 cm ( $v_L = 4291 \pm 18,6$  m/s) eine geometriebedingte Zunahme der Schallgeschwindigkeit von  $v_L = 139$  m/s. Die Differenz, bezogen auf den Ausgangswert, beträgt 3,3 %. Dieser Wert steht in guter Übereinstimmung mit POHL [33], der für Schallwege im Beton  $> 1$  m vorschlägt, daß bei einem Verhältnis der Schallwege  $s_q/s_l < 0,2$  für  $v_L$  ein Korrekturwert von 150 m/s verwendet wird.

### 2.2.2 Eigenfrequenzmessung bei Resonanzerregung

Die ersten grundlegenden Arbeiten zur Aufstellung von Gleichungen zur Berechnung der Hauptresonanzen der Dehn-, Biege- und Torsionsschwingung für unendlich lange Stäbe mit kreisförmigem Querschnitt wurden von POCHHAMMER 1876 durchgeführt. Weitere Arbeiten zur Vervollkommnung des Formelwerkes zur Beschreibung des elastischen Verhaltens von Festkörpern mit unterschiedlichen Geometrieeigenschaften von LORD RAYLEIGH (ab 1887), CHREE (1889), TIMOSHENKO (1921), GOENS, PICKETT und MARTINČEK schließen sich an [37]. Von POHL [33] werden vor allem die auf das Bauwesen orientierten Anwendungen betrachtet.

Bei der Resonanzfrequenzmethode wird der zu untersuchende Probekörper mit konstanter harmonischer Erregung (Sinusgenerator) nach kurzer Einschwingzeit zum Schwingen in der Erregerfrequenz angeregt (erzwungene Schwingung). Die Erregerfrequenz ist stufenlos regelbar (Frequenzbereich Elastometer der Firma LABEK: 1,0 bis 150 kHz) und führt im Resonanzfall zu einer Amplitudenverstärkung der angeregten Eigenschwingungsform [37, 62]. Die Wandlung zwischen elektrischen und mechanischen Schwingungen erfolgt durch Resonanzgeber- bzw. aufnehmer auf der Basis magnetostriktiver oder piezoelektrischer Prozesse [126]. Zu beachten ist die Art der Auflage des Probekörpers. Sie sollte vorzugsweise in den Schwingungsknoten oder vollflächig auf einer dämpfenden Schaumstoffunterlage erfolgen. Die geringste Dämpfung des Probekörpers tritt für Zylinderproben nach REICHARDT und MEUCHE [127] auf überkreuz gespannten Metallsaiten ein. Der Anpreßdruck der Wandlerysteme wird durch entsprechende Vorrichtungen erreicht. Bild 2.32 zeigt das Resonanzfrequenz-Meßgerät Elastometer der Firma LABEK. Die Bedienung des Meßgerätes, die Vorausberechnungsmöglichkeiten für die zu erwartende Resonanzfrequenz sowie die Anwendung der Berechnungsformeln können [126] entnommen werden.

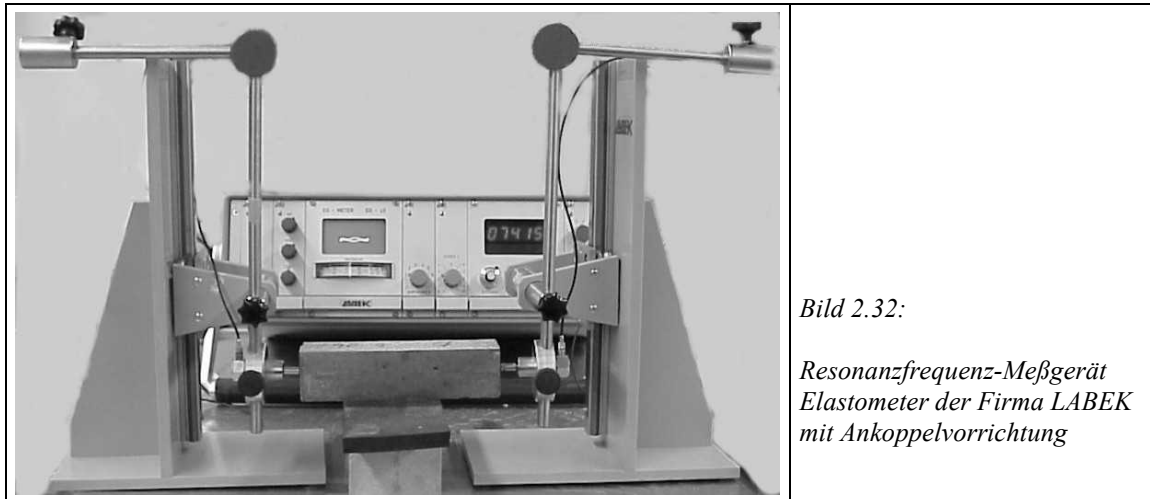


Bild 2.32:

*Resonanzfrequenz-Meßgerät  
Elastometer der Firma LABEK  
mit Ankoppelvorrichtung*

Die im experimentellen Teil dieser Arbeit durchgeführten Resonanzmessungen wurden nach dem Dehnwellenresonanz-Verfahren durchgeführt. Die Beschreibung des Meßverfahrens wurde ausführlich in [34] vorgenommen. Die Grundlage des Meßverfahrens besteht in der Digitalisierung unterschiedlich langer Signalauschnitte des Zeitsignales. Bei unveränderten Ankoppelbedingungen werden zwei Messungen durchgeführt, eine Messung mit einer hohen Abtastrate (20 MHz) zur Bestimmung der Impulslaufzeit  $t_L$  und eine Messung mit niedriger Abtastrate (200 kHz) zur Ermittlung der Resonanzschwingung  $f_d$  aus dem Frequenzspektrum der FFT. Aus der korrigierten Dehnwellenresonanz unter Einbeziehung der Probekörpergeometrie nach [37], wird das Verhältnis der Wellengeschwindigkeit  $v_D/v_L$  gebildet, aus dem direkt  $\mu_d$  und indirekt  $v_T$  und  $v_O$  nach [40] berechnet werden.  $E_{dyn}$  wird unter Einbeziehung von  $v_L$ ,  $\rho_{roh}$  und  $\mu_d$  nach Gleichung (2.8) berechnet. Wird  $E_D$  nach Gleichung (2.14) unter Verwendung von  $f_d$  und  $M_a$  (korrigiert durch  $\mu_d$ ) berechnet, so besteht Übereinstimmung zwischen den berechneten E-Modulwerten, die ermittelten Differenzen betragen maximal 1,2 %. Dieser Sachverhalt ist damit zu begründen, daß die Berechnung von  $M_a$  eine absolut exakte Zuordnung zwischen Geometriefaktor  $a/l$  und  $\mu_d$  erfordert, die aufgrund von Rundungsfehlern nicht gegeben ist. In den weiteren Darstellungen wird der entsprechend dem Dehnwellenresonanzverfahren nach Gleichung (2.8) berechnete dynamische E-Modul  $E_{dyn}$  als  $E_D$  bezeichnet. Das Bild 2.33 zeigt einen Meßplatz zur Durchführung der Dehnwellenresonanzmessungen an einem Betonprisma der Abmessungen  $80 \times 80 \times 250 \text{ mm}^3$ , Bild 2.34 beinhaltet das Datenflußschema zur Durchführung des Meßverfahrens, Bild 2.35 das digitalisierte Zeitsignal zur Bestimmung der Laufzeit und Bild 2.36 das FFT-Spektrum der dazugehörigen Resonanzschwingungen.

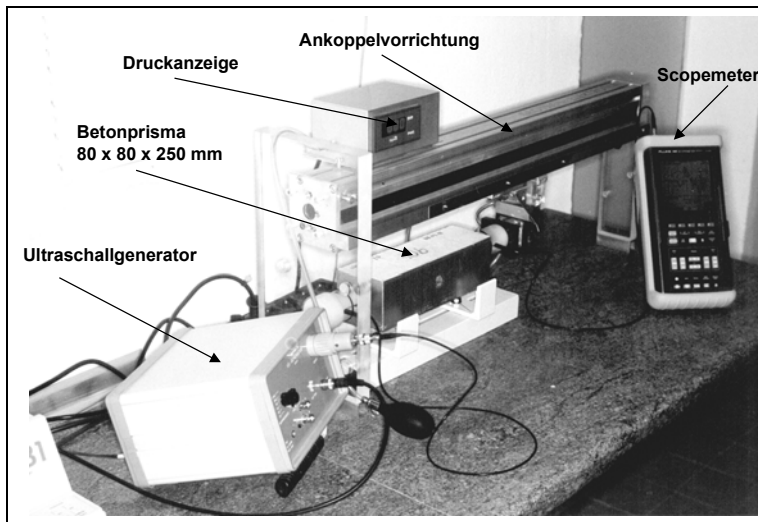


Bild 2.33:

Meßgeräteanordnung zur Durchführung von Schalllaufzeit- und Dehnwellenresonanzmessungen

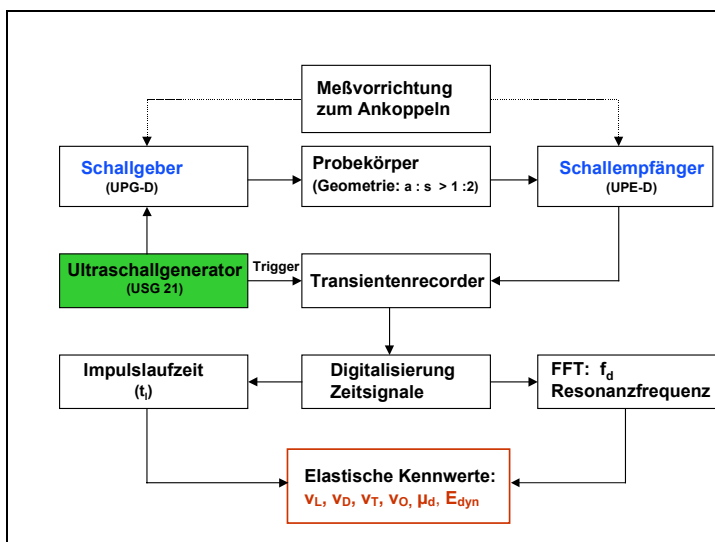


Bild 2.34:

Datenflußschema des Dehnwellenresonanzverfahrens

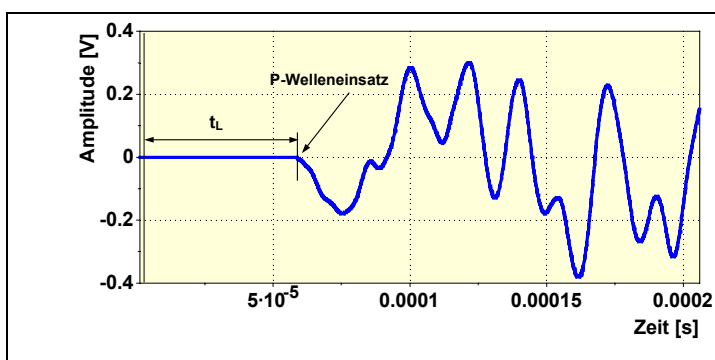
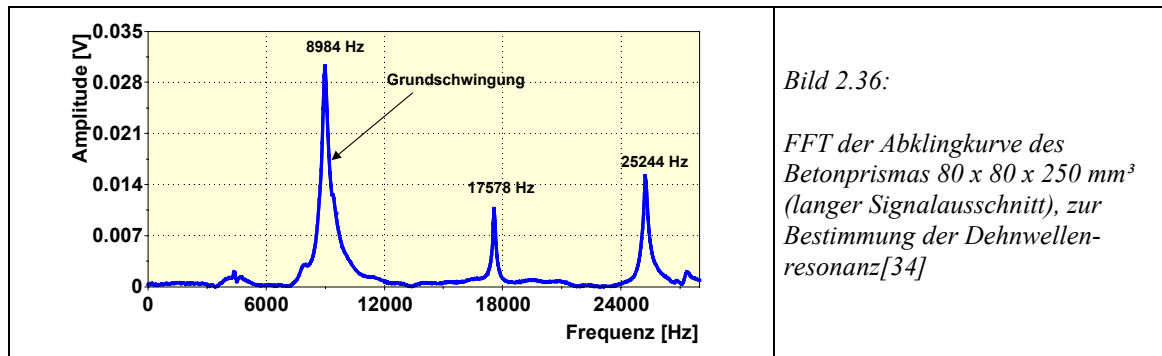


Bild 2.35:

Schalllaufzeitmessung an einem Betonprisma der Abmessungen  $80 \times 80 \times 250 \text{ mm}^3$  (kurzer Signalausschnitt), [34]



### 2.2.3 Eigenschwingzeit nach Impulsanregung

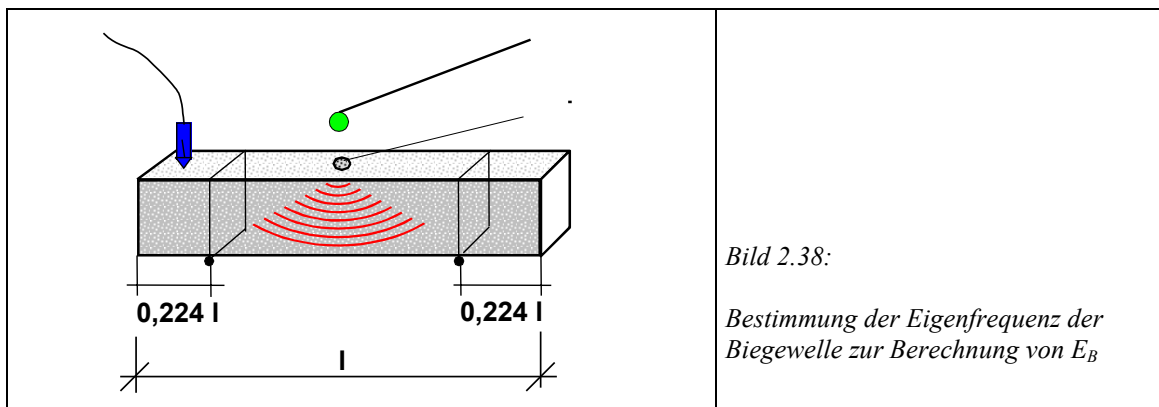
Bei der Eigenschwingzeitmessung (Klangprobe) wird durch einen einmaligen mechanischen Impuls, z.B. mit einer Metallkugel, eine freie Schwingung angeregt, die in Abhängigkeit der Dämpfungseigenschaften des Systems mit der Zeit abklingt. Diese Schwingung stellt eine Überlagerung der angeregten Eigenformen dar, wobei jede Schwingungsform in ihren Eigenfrequenzen schwingt. Die Amplituden der Eigenfrequenzen höherer Ordnung werden stärker gedämpft, so daß nach einer bestimmten Schwingzeit der Probekörper nur noch in der 1. Eigenfrequenz (Grundschiwingung) schwingt. Die Aufnahme der Schwingung kann mechanisch durch einen piezoelektrischen Detektor (Tastspitze) oder berührungslos mit einem hochempfindlichen Mikrofon erfolgen. Der Vergleich mit einem Präzisionsschwingquarz erlaubt die Bestimmung der exakten Schwingzeit (oder Frequenz) aus der Mittelung mehrerer Schwingungsperioden (Nulldurchgänge) des Signals.



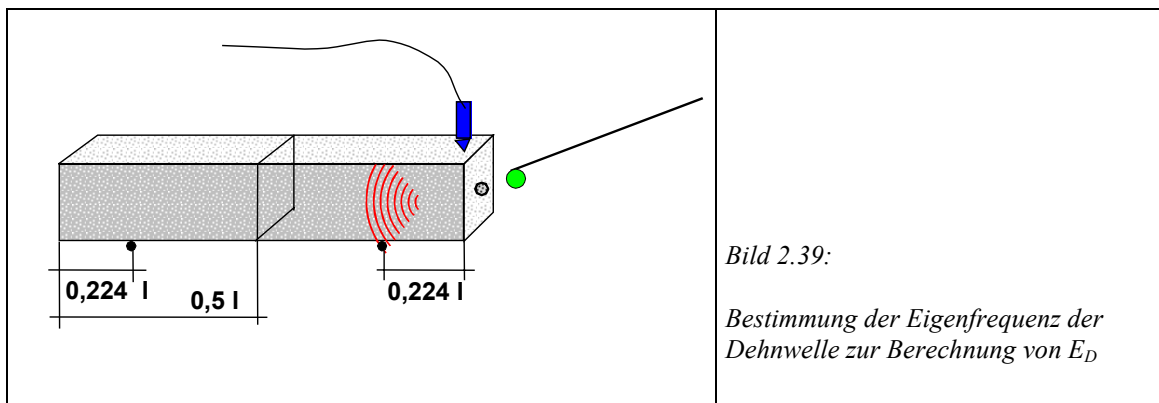
Das Bild 2.37 zeigt einen Meßplatz zur Durchführung der Eigenschwingzeitmessung. Das Datenflußschema Bild 2.41 verdeutlicht die Durchführung der Messungen mit zusätzlicher Digitalisierung des Zeitsignales (Abklingkurve) zur Bestimmung des Verlustfaktors  $\eta$ . Im Bild 2.38 bis Bild 2.40 sind für die jeweilige Schwingungsform die



Lage der Knotenebenen, die Anschlag- und Abnahmepunkte im Bereich der Amplitudenmaxima der stehenden Welle (Schwingungsbauch) zur Frequenzmessung dargestellt [62, 128]. Die Anwendung der gleichen Auflage in den Schwingungsknoten der Biegeschwingung zur Messung der 1. Eigenfrequenz aller Eigenformen wird durch das Mitschwingen der Knotenebenen während des Meßvorganges ermöglicht. Die angegebenen Gleichungen (2.24), (2.25) und (2.26) zur Berechnung von  $E_B$ ,  $E_D$  und  $G_T$  berücksichtigen nur Probekörper mit quadratischer Querschnittsfläche (für andere Querschnittsformen siehe [60, 33, 85, 129]).

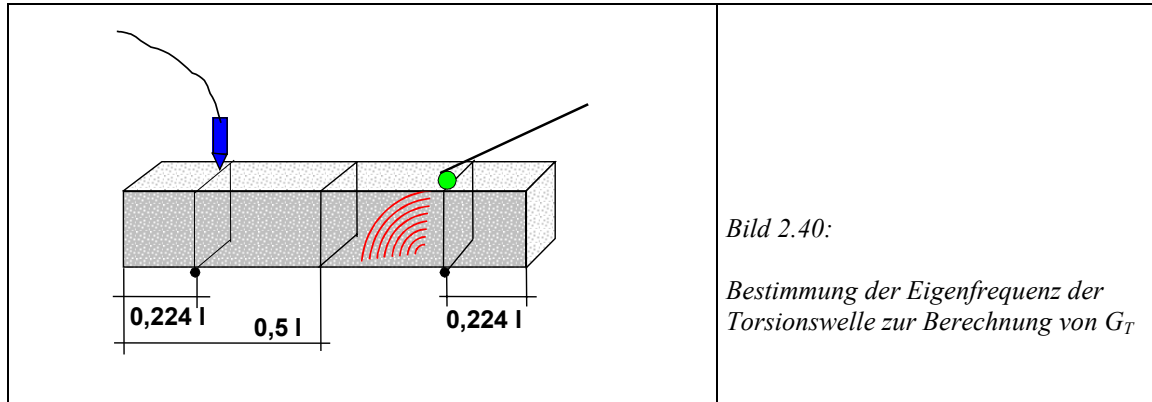


$$E_B = 0,9465 \frac{m f_b^2}{a} \cdot \frac{l^3}{a^3} T_i \text{ nach [60, 61]} \quad (2.24)$$



$$E_D = f_d^2 l^2 \rho_R C_D; \quad C_D = \left( \frac{2}{k} \right)^2 \cdot \left[ 1 + \frac{(k \pi \mu_{dyn} i_p)^2}{l^2} \right]; \quad i_p^2 = \frac{2a^2}{12} \quad (2.25)$$

nach [33, 62, 129]



$$G_T = \frac{4lmf_t^2}{a^2} \left[ \frac{B}{1+A} \right] \text{ mit } B = 1,183 \text{ und } A = -1,313 \cdot 10^{-3} \text{ nach [60, 61]} \quad (2.26)$$

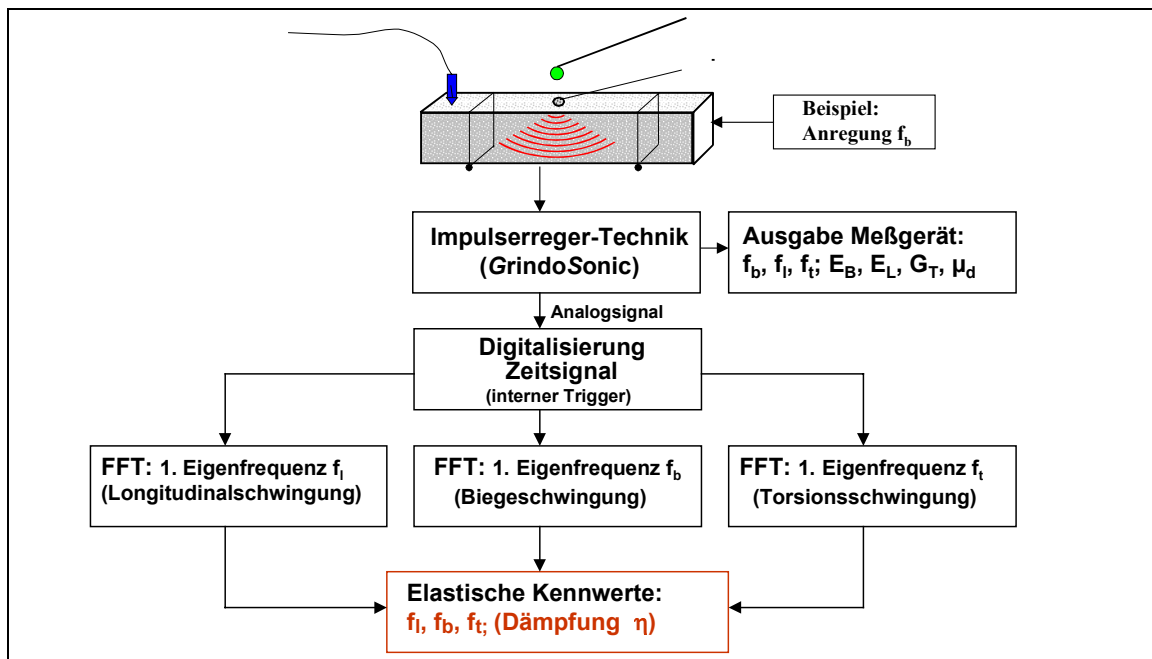


Bild 2.41: Datenflußschema des Impulserregerverfahrens mit zusätzlicher Digitalisierung der Zeitsignale zur Durchführung von Dämpfungsmessungen

## 2.2.4 Laserverfahren

Die Anregung von Schallwellen in Beton erfolgt bei der konventionellen Durchführung des Ultraschallverfahrens mit piezoelektrischen oder magnetostriktiven Schallgebern, die an das Meßobjekt punktuell mechanisch angekoppelt werden müssen. Dabei treten Energieverluste auf, die zu einer Dämpfung des Signals führen (siehe Kapitel 2.2.1). Die Lösung geometrisch komplexer Prüfaufgaben mit zum Teil schwer zugänglichen Untersuchungsflächen sowie die Durchführung einer flächendeckenden Untersuchung größerer Untersuchungsbereiche ist mit einem hohen Zeitaufwand verbunden. Die

Lösung dieses Problems kann durch die Entwicklung berührungslos arbeitender Techniken zur Schalleinleitung und -abnahme erreicht werden [130, 131].

Eine berührungslose Anregung von Schallwellen in metallischen Werkstoffen kann durch Anwendung elektrodynamischer [28, 131], röntgenographischer [131] und laser-optischer [28, 131] Verfahren ermöglicht werden, wobei nur das Laserverfahren bisher die erforderliche praktische Bedeutung erlangt hat. Ein zusätzlicher und zugleich entscheidender Vorteil entsteht aus dem Einsatz laseroptischer Techniken durch die räumliche Bündelung des Laserlichtes und der daraus resultierenden Strahlführung ohne wesentliche Divergenzverluste über Entfernungen von mehreren Metern.

♦ *Anregung von Schallwellen*

Literaturhinweise zur laserinduzierten Schallanregung in Beton beschränken sich auf Einzelfälle. POPOVICS und ROSE [132] beschreiben den Vorgang der Schallanregung in Abhängigkeit von der Laserenergie als thermoelastischen oder ablativen Prozeß, wobei nur der letztere bei Beton anwendbar ist. Sie begründen den Vorgang der Schallanregung mit dem Verdampfen einer sehr dünnen Schicht der Betonoberfläche, so daß durch den Rückstoß die erforderliche Druckwelle entsteht. Die Anregung wurde mit einem Neodym-YAG-Laser durchgeführt. Die angeregte Schallwelle wird als breitbandig charakterisiert. Als erforderliche Impulsleistungsdichte werden 2000 MW/cm<sup>2</sup> angegeben. Als attraktivster Vorteil dieser Methode wird die berührungslose Anregung aus größeren Distanzen benannt.

Aussagekräftige Parallelen zu den Wirkmechanismen der Laseranregung von Schallwellen ergeben sich aus dem erzielten Entwicklungsstand zum Laserreinigungsverfahren von Natursteinoberflächen [133]. Zur Laserreinigung werden kurz gepulste, intensitätsstarke (gütegeschaltete) Nd: YAG-Laser verwendet. Die abtragende Wirkung wird von den Material- (Wärmeleitfähigkeit, Absorptionkoeffizient, Verdampfungsenergie) und Laserkennwerten (Energiedichte, Pulsdauer, Wellenlänge) beeinflusst. Es wird in thermische und photoakustische Ablation unterschieden. Die thermische Ablation führt durch Pulslängen im Mikrosekundenbereich zum Verdampfen der bestrahlten Partikelbereiche. Die photoakustische Ablation entsteht durch kurze Pulslängen im Nanosekundenbereich mit hoher Intensität, so daß sogenannte Schockwellen ausgelöst werden [133].

In [26, 28, 131] wird die Laseranregung von Schallwellen für metallische Materialien beschrieben. Die Möglichkeit einer laserinduzierten Anregung von Schallwellen wurde nach [131] bereits 1963 nach der Erfindung des Laser nachgewiesen. Die Wirkmechanismen beruhen auf der teilweisen Absorption der elektromagnetischen Energie in einer extrem dünnen Oberflächenschicht des Probekörpers, die in Wärme umgesetzt wird (innerer Photoeffekt). Der Umwandlungsprozeß der Laser-Strahlungsenergie in Wärmeenergie erfolgt in einem Zeitraum, der gegenüber der Laserpulsdauer und der zur Wärmeausdehnung benötigten Zeit sehr kurz ist. Die Tiefe des Wechselwirkungsbereiches zwischen den Photonen der Laserstrahlung und den Elektronen des Festkörpers kann durch die optische Skintiefe  $d_{\text{opt}}$  beschrieben werden, die z.B. bei Alumi-

nium bei einer Strahlung eines Nd: YAG Lasers mit  $\lambda = 1,064 \mu\text{m}$  5 nm beträgt [131]. Die im Bereich des Laserflecks entstehenden thermomechanischen Spannungen regen die benachbarten Volumenelemente zum Schwingen an [26, 28, 131]. Dabei haben die Strahlparameter (z.B. Wellenlänge, Energiedichte) entscheidenden Einfluß auf die sich ausbildende Wellenart und deren Frequenzgehalt. Die Impulsform des Lichtimpulses beeinflusst den anregbaren Frequenzbereich der Schallwellen. So erfordert die Anregung höherer Frequenzbereiche eine kürzere Impulsdauer. Erfolgt die Anregung ohne Plasmabildung, so besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Schallamplitude und Energiedichte, wird ein Plasma an der Metalloberfläche erzeugt, so erhöht sich die Schallamplitude der Longitudinalwelle erheblich stärker [26]. Nach [131] liegt dieser Übergangsbereich zur Plasmabildung bei einer Impulsleistungsdichte des Lasers bei  $> 10 \text{ MW/cm}^2$ , optimale Anregungsintensitäten liegen für Aluminium im Bereich von 200 bis  $400 \text{ MW/cm}^2$ . Geringere Leistungsdichten beinhalten den rein thermoelastischen Effekt der laserinduzierten Schallanregung. Grundsätzlich können mit Lichtimpulsen alle Wellenarten angeregt werden, in Abhängigkeit von der eingestrahlten Energiedichte, jedoch bestimmte Wellenarten bevorzugt [26]. Erfolgt die Anregung mit niedriger Energiedichte, so dominiert die Schwingungsrichtung parallel zur Oberfläche mit geringen transversalen und longitudinalen Schwingungsamplituden (Bild 2.42). Wird der Laserstrahl zusätzlich gebündelt, so dominiert mit zunehmender Energiedichte aufgrund des Verdampfens der oberflächennahen Atome und des einsetzenden mechanischen Rückstoßes die longitudinale Schwingungsrichtung Bild 2.43. Eine zusätzliche Befeuchtung der Oberfläche führt zu einer explosionsartigen Verdampfung der Wasserteilchen, so daß die Rückstoßkraft kurzzeitig stark erhöht werden kann (siehe Kapitel 4.6).

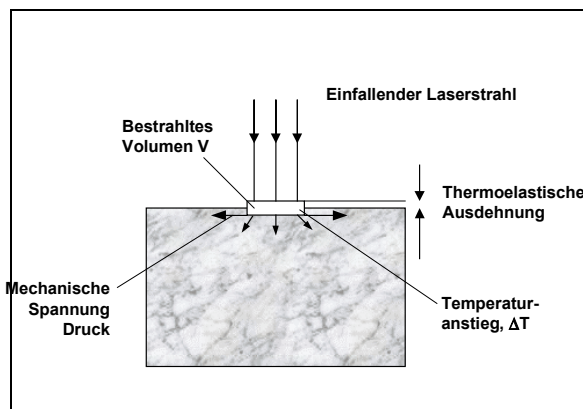


Bild 2.42: Anregung von Ultraschallwellen mit parallelem Laserstrahl [26, 28]

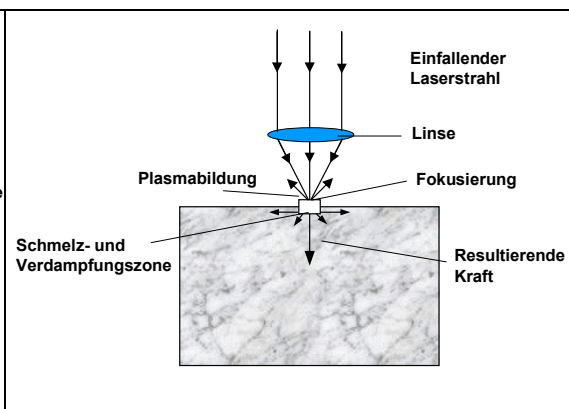


Bild 2.43: Anregung von Ultraschallwellen mit fokussiertem Laserstrahl [26, 28]

Da die experimentellen Arbeiten zur Laseranregung (Kapitel 4.6) von Schallwellen mit einem Festkörperlaser (Neodym-YAG-Laser) durchgeführt wurden, sollen die weiteren Erläuterungen der theoretischen Grundlagen sich nur auf diese Gerätesysteme beziehen.

Der LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) ist ein quantenelektronischer Verstärker von elektromagnetischen Wellen im sichtbaren Spektralbereich ( $\lambda = 400$  bis  $800$  nm) sowie der angrenzenden Bereiche Infrarot und Ultraviolett. Neueste Entwicklungen dringen in den Bereich des Röntgenlichtes vor. Seit der experimentellen Realisierung der ersten Lasersysteme, des Rubin-Lasers im Jahre 1960 (MAIMAN, T.; Hughes-Forschungslabor Malibu) und des Helium-Neon-Lasers 1961 (JAVAN; BENNETT, HERRIOTT), wurden ca. 150 Lasersysteme entwickelt. Laserlicht unterscheidet sich gegenüber der Strahlung konventioneller Lichtquellen durch räumlich (starke Bündelung) und zeitlich (geringe Phasenschwankungen, Monochromasie) kohärente Strahlung, die eine hohe Intensität (bei Puls laser  $10^{10}$  bis  $10^{13}$  W) aufweist und zur Erzeugung ultrakurzer Lichtimpulse geeignet ist [134, 135].

Die Hauptbestandteile eines Lasers sind ein Lasermedium (Festkörper, Flüssigkeiten, Gase), eine Pumpquelle (z.B. optisch gepumpte Laser durch Blitzlampen) zur Anregung des Lasermediums und ein Resonator zur Rückkopplung der Laserstrahlung in das Lasermedium zur Anregung einer Laseroszillation.

Beim Laser werden prinzipiell zwei Betriebsarten unterschieden. Das sind der Dauerstrichlaser (cw-Laser: continuous wave) mit zeitlich konstanter Ausgangsleistung und der Impulslaser mit gepulster Anregung. Die Untergliederung der Lasertypen kann auch nach dem Aggregatzustand des Lasermaterials (Festkörper-, Flüssigkeits-, Gas- und Freie- Elektronen-Laser) oder nach der Art der Anregung des Lasermaterials (z.B. durch Blitzlampen optisch gepumpte Laser) erfolgen [134].

Der wichtigste Festkörperlaser ist der Neodym-Laser, bei dem als aktives Medium am häufigsten ein Nd: YAG-Kristall verwendet wird. Reiner YAG (Yttrium-Aluminium-Granat –  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) ist ein farbloser, optisch isotroper Granat mit kubischer Struktur. Die Dotierung erfolgt in der Schmelze mit  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ , so daß ca. 1 % der  $\text{Y}^{3+}$ -Ionen durch  $\text{Nd}^{3+}$  ersetzt werden, die zur Erzeugung der Laserstrahlung verwendet werden. Die emittierte Wellenlänge liegt bei üblichen Betriebstemperaturen bei  $1,0641 \mu\text{m}$ . Der Nd-YAG-Laser ist ein Vierniveausystem, wodurch geringere Pumpenergien erforderlich und dadurch höhere Pulsfolgefrequenzen im Bereich von 10 bis 100 Hz erreichbar sind [134].

Die Anregbarkeit von Schallwellen sowie die entstehende Wellenart werden durch die Strahlparameter Wellenlänge, Frequenz, Energie- und Leistungsdichte sowie Pulsdauer entscheidend beeinflusst (siehe Kapitel 4.6). Weiterhin bestimmen die Parameter Wirkungsgrad, technischer Aufwand, Strahlprofil und -divergenz, Fokussierbarkeit und Polarisation sowie die Stabilitätseigenschaften der Laserstrahlung und das von der Laserstrahlung ausgehende Gefährdungspotential, in welchem Umfang diese Methode für Labor- und Baustellenmessungen eingesetzt wird.

#### ◆ *Empfang von Schallwellen*

Die Bewegungen von Bauwerksteilen (Eigenschwingungen) sowie die durch den Durchgang von Schallwellen verursachten Vibrationen von Oberflächen können mit

einem Laser-Interferometer als Weg- oder Geschwindigkeitsamplituden berührungslos, punktuell gemessen werden. Für die Durchführung der experimentellen Arbeiten stand ein PSV 300 F (Polytec-Scanning-Vibrometer) zur Verfügung.

#### ➤ Laserinterferometrie

Auf die Laser-Interferometrie soll an dieser Stelle mit dem Hinweis auf Kapitel 4.7 und der zur Verfügung stehenden umfangreichen Fachliteratur z.B. [26, 29] nur kurz eingegangen werden.

Das Polytec-Scanning-Vibrometer (Laser-Doppler-Vibrationssensor) realisiert die Weg- und Geschwindigkeitsmessung mittels eines modifizierten Mach-Zehnder-Interferometers [136, 137]. Als Lichtquelle wird ein Helium-Neon-Laser ( $\lambda = 633 \text{ nm}$ ) verwendet, der einen linear polarisierten Strahl zur Verfügung stellt. Durch einen polarisierenden Strahlteiler erfolgt die Aufteilung in einen Meß- und in einen Referenzstrahl, die nach Durchlaufen unterschiedlich langer optischer Wegstrecken im Meßsystem zur Interferenz gebracht werden. Der Referenzstrahl gelangt unmittelbar auf einen Strahlteiler und wird zum Detektor umgelenkt. Der Meßstrahl ist auf das Meßobjekt gerichtet und wird von dort je nach Reflexionseigenschaften der untersuchten Objekt-oberfläche in das Meßsystem zurückgestreut. Dabei bewirkt die Frequenzdifferenz (Phasenverschiebung) eine Helligkeitsmodulation an der Fotozelle, so daß ein elektrisches Signal ausgegeben werden kann Bild 2.44 [138]. Zur Erkennung der Bewegungsrichtung wird auf den Referenzstrahl eine feste Frequenzverschiebung (40 MHz) aufmoduliert, so daß bis zu diesem Wert Dopplerfrequenzen gemessen werden können (Maximalwert der Schwingungsgeschwindigkeit 12,6 m/s) [137].

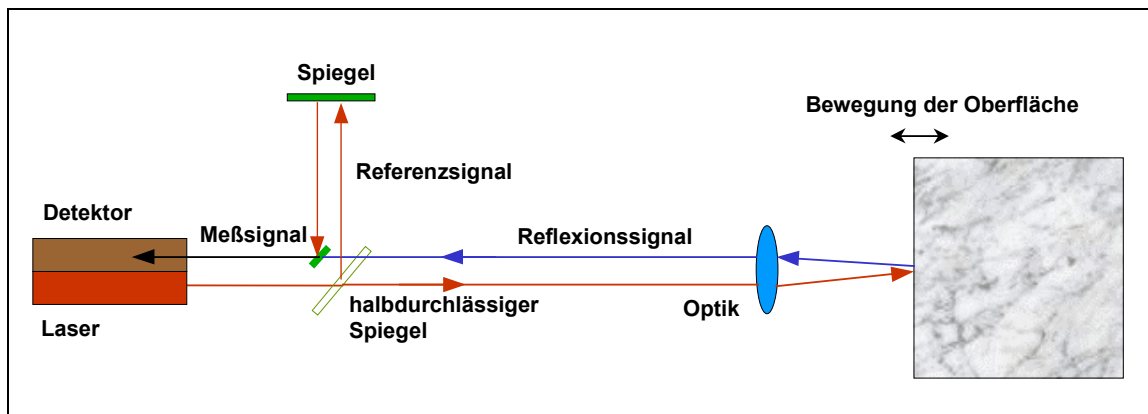


Bild 2.44: Empfang des Ultraschallsignals mit einem Laservibrometer [136]

#### ➤ Holographische Interferometrie

Mit der holographischen Interferometrie können ebenfalls aus Entfernungen von mehreren Metern die berührungslose und großflächige Abnahme von Oberflächenaußenlenkungen im Mikrometerbereich mit hoher axialer Auflösung erreicht werden [131]. Der kohärente Lichtstrahl eines Lasers wird mit Hilfe eines Strahlteilers in einen Objekt- und Referenzstrahl aufgespalten. Der Objektstrahl durchläuft einen Raumfilter

und wird anschließend auf das Meßobjekt gelenkt. Der vom Meßobjekt reflektierte Objektstrahl, der alle Informationen der Oberflächentopographie enthält, wird mit dem Referenzstrahl auf dem Holographiefilm überlagert, so daß im Ergebnis der Belichtung das Hologramm entsteht. Bei der Beleuchtung des Hologramms mit dem Referenzstrahl können die Oberflächenbewegungen rekonstruiert werden [131, 29].

➤ Defektoskopie (Ortung von Hohlräumen)

Bei dieser Verfahrenstechnik werden Frequenzsignale, die durch eine stehende Welle zwischen Betonoberfläche und Reflexionsebene (z. B. Hohlraum) erzeugt werden, auf der Basis des Impact-Echo-Verfahrens ausgewertet. Dazu wurden von KRIEGER et al. [139, 104] der BAM Berlin ein Untersuchungsverfahren entwickelt, welches zur Ortung von Hohlräumen (z.B. in Spannkänen) den Einsatz eines Laservibrometers zum Scannen der Betonoberfläche vorsieht, die auf der gleichen Seite konventionell durch mechanisch angekoppelte Schallgeber angeregt wird. Damit wird die Bearbeitung von Prüfaufgaben ermöglicht, die nur von einer Seite zugängliche Untersuchungsflächen (z. B. Fundamente) beinhalten.

➤ Messung von Eigenschwingungen

Im Gegensatz zur Anregung mit hochfrequenten Schallwellen werden Eigenschwingungen von Bauwerksteilen mit niedrigen Frequenzen aus Belastungen z.B. durch Wind, Straßenverkehr oder Glockengeläut angeregt.

Als Beispiel für zahlreiche Anwendungen, um Eigenschwingungen mit Laserinterferometern zu messen, sollen die Untersuchungen von ELLIS [140] SCHROTH et al. [141] angeführt werden. Sie berichten von der Anwendung der Laserinterferometrie zur Bestimmung von Eigenschwingungen von Gebäuden bzw. Bauwerksteilen. So hat ELLIS [140] das Eigenschwingverhalten des Glockenturmes „Big Ben“ (Palace of Westminster) im Vergleich zu benachbarten Glockentürmen gemessen. Weiterhin wurde das Eigenschwingverhalten von Bauwerksteilen nach einer Brand- bzw. Explosionsschädigung untersucht. Die Vorteile des Lasermeßsystemes, aus großen Entfernungen bis ca. 100 m (bei gut reflektierender Oberfläche bis 500 m) genaue Meßdaten zu erzielen, wird als der entscheidende Vorteil dieses Meßverfahrens gewertet. Die Verfasser von [141] untersuchten mit zwei Lasermeßsystemen OMITRON, VS 100 (Laser 1 für Referenzsignal, Laser 2 für Eigenschwingung) die Schwinggeschwindigkeit des Fernsehturmes in Cottbus.

### 3 Zielstellung der eigenen Arbeiten

Zentrales Thema im experimentellen Teil dieser Arbeit ist die Darstellung von Gefügeveränderungen, die sowohl Gefügeschädigungen als auch die Gefügeentwicklung (Aufbau des Festkörperskeletts) beinhalten. Zur Erfassung der Gefügeveränderungen werden ausschließlich zerstörungsfreie, akustische Meßverfahren, wie das Ultraschall-, Resonanzfrequenz- und Eigenschwingzeitverfahren benutzt.

Der experimentelle Teil untergliedert sich in folgende Komplexe:

- Durchführung von Voruntersuchungen zum Ultraschallmeßsystem mit dem Schwerpunkt der Untersuchung der Sendefrequenzen der verwendeten Schallgeber, der Bestimmung des erforderlichen Ankoppeldrucks und der Ermittlung der gerätespezifischen Verzögerungszeiten. Aus den Untersuchungsergebnissen sollen für die experimentellen Arbeiten konkrete Meßbedingungen abgeleitet werden. Weiterhin werden Grundlagenuntersuchungen zur laserinduzierten Anregung und zur berührungslosen Erfassung von Ultraschallwellen zur Realisierung des Durchschallungsverfahrens (Impulslaufzeitmessung) durchgeführt.
- Erfassung der Gefügeveränderung während der Prüfung des Frostwiderstandes an Normalbetonen zur Ableitung von Dauerhaftigkeitskennwerten (A-Scan). Schwerpunkte bilden die Untersuchungen zum entstehenden Schädigungsgradienten (B-Scan) sowie der Änderung des dynamischen E-Moduls und der Querdehnzahl auf der Basis des Dehnwellenresonanzverfahrens. Dabei kommt auch der Visualisierung des Schädigungsgradienten eine besondere Bedeutung zu. Vergleichende Betrachtungen zur zusätzlich ermittelten Biegeschwingung durch Impulsanregung und zum CIF-Test werden vorgenommen. Mechanische Kenngrößen, wie die empfindlich auf Gefügeschädigungen reagierende Biegezugfestigkeit, werden vor und nach der Prüfung des Frostwiderstandes ermittelt.
- Durchführung von kontinuierlichen und diskontinuierlichen Ultraschallmessungen während der Hydratation von Beton, Mörtel und Zementleim mit dem Ultraschallmeßsystem CONSONIC 60. Aufgezeichnet werden in kurzen Meßintervallen die Schallgeschwindigkeit  $v_L$ , um unter Einbeziehung der Rezeptur die Berechnung der Erhärtungsdruckfestigkeit  $\beta_{D(US)}$  vorzunehmen. Die berechnete Druckfestigkeit  $\beta_{D(US)}$  wird mit der zerstörend ermittelten Druckfestigkeit  $\beta_{D(Wm)}$  verglichen. Aus den abgespeicherten Ultraschallsignalen wird nachträglich die Höhe der Erstamplitude berechnet.
- Homogenitätsuntersuchungen an Laborprobekörpern und Bauwerksteilen durch Anwendung neuer Verfahrenstechniken, um durch Realisierung einer hohen Meßpunktdichte und Meßgeschwindigkeit eine verbesserte räumliche Auflösung zur Darstellung von Inhomogenitäten zu erreichen. Dazu werden im ersten



Lösungsschritt die Schalleinleitung noch durch mechanische Ankopplung eines Schallgebers realisiert und die Aufnahme der Zeitsignale zur Berechnung des dynamischen E-Moduls mit einem Laservibrometer durchgeführt. Die Meßkette besteht aus dem Ultraschallmeßsystem CONSONIC 60 und dem Laservibrometer PSV 300 F. In einem zweiten Verfahrensschritt soll anhand von Laborversuchen nachgewiesen werden, daß Ultraschallmessungen hinsichtlich Anregung und Empfang von Schallwellen berührungslos (rein optisches Meßverfahren) durchgeführt werden können.

Die experimentellen Arbeiten zur laserinduzierten Schallanregung in Baustoffen wurden im Rahmen des Teilprojektes B1 „Diagnostik und Qualitätskontrolle durch zerstörungsfreie, berührungslose Prüfverfahren“ im Sonderforschungsbereich 524 der Bauhaus-Universität Weimar, in Zusammenarbeit mit dem Labor für Bauwerksdiagnostik, Archäometrie und Geophysik, Herrn Köhler, durchgeführt.

## 4 Charakterisierung des Ultraschallmeßsystems

Im Kapitel 2.2.1 wurde bereits auf den Einfluß der einzelnen Elemente der Meßkette auf die Aussteuerung der Erstamplitude des Ultraschallsignals hingewiesen. Im Kapitel 4 sollen nun die wichtigsten Einflußgrößen genauer betrachtet werden. Im Vordergrund stehen Untersuchungen zur Schallabstrahlung der für die experimentellen Versuche verwendeten Schallwandler einschließlich der Bestimmung der gerätechischen Verzögerungszeiten. Weiterhin werden die Auswirkungen der Ankoppelbedingungen auf die Impulslaufzeit und die Höhe der Erstamplitude dargestellt. Mit einbezogen werden in dieses Kapitel die ersten Untersuchungsergebnisse der berührungslosen Anregung und des Empfangs von Schallwellen durch Anwendung von Lasertechniken.

### 4.1 Bestimmung der Schallgeberfrequenzen mittels Laservibrometer

Die Schalluntersuchungen wurden zu den Schwerpunkten Frostwiderstand, Hydratationsverlauf und Homogenität (Tomographie) durchgeführt. Tabelle 4.1 vermittelt einen Überblick zu den für die einzelnen Untersuchungsschwerpunkte verwendeten Schallgebertypen der Firma GEOTRON und deren wichtigste Kennwerte. Alle angegebenen Schallgebertypen erzeugen die erforderlichen mechanischen Schwingungen auf der Basis des piezoelektrischen Effektes [117], ausgenommen des UNG 20.

Tabelle 4.1: Übersicht der verwendeten Schallgeber und deren Anwendungsgebiete

Schallgebertyp	resonant/ breitbandig	Resonanzfrequenz $f_r$ [kHz] <sup>1</sup>	Kopffläche [cm <sup>2</sup> ]	Anwendung
UPG-D	breitbandig	-	0,07 ( $\varnothing = 0,3$ )	Frostwiderstand
UPG-S	resonant	100	11,3 ( $\varnothing = 3,8$ )	Frostwiderstand
UPG 250	resonant	250	11,3 ( $\varnothing = 3,8$ )	Frostwiderstand
TS 250 <sup>2</sup>	resonant	225	11,9 ( $\varnothing = 3,9$ )	Hydratation
UPG-D (ZLB) <sup>3</sup>	breitbandig	-	2,5 ( $\varnothing = 1,8$ )	Hydratation
SW 30 (T) <sup>4</sup>	resonant	30	21,2 ( $\varnothing = 5,2$ )	Homogenität
UNG 20	resonant	20	10,7 (2,1 x 5,1)	Homogenität

<sup>1</sup> Herstellerangabe, auch als Prüffrequenz bezeichnet

<sup>2</sup> Untersuchungen mit der Tauchsonde (TS)

<sup>3</sup> modifizierter UPG-D für Untersuchungen im Zementleimbecher (ZLB)

<sup>4</sup> kombiniert als Flächen- und Tastprüfkopf einsetzbar

Die Ursache der Piezoelektrizität ist in der Asymmetrie des Kristallaufbaus begründet. Der direkte piezoelektrische Effekt beinhaltet die Umwandlung von mechanischer Energie in elektrische Energie, das heißt, ein äußerer mechanischer Druck führt zur Entstehung von elektrischen Ladungen auf der Kristalloberfläche. Dieser Effekt wird zur Umwandlung von mechanischen Schwingungen in ein elektrisches Signal am Schallempfänger genutzt. Die Umkehrung dieses Prozesses führt zur Entstehung von mechanischen Schwingungen, die als Schallwellen vom Schallgeber auf den zu untersuchenden Probekörper übertragen werden. Das älteste technisch genutzte Piezomaterial ist Quarz. Die gegenwärtig wichtigsten piezoelektrischen Materialien sind ferroelektrische Mischkeramiken (z.B. Bleizirkonattitanat  $\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$ ). Sie bestehen aus kleinen kristallinen Bereichen mit einer spontanen elektrischen Polarisierung. Die bei diesen Kristallen bereits im Ruhezustand vorhandene Verschiebung von positiven und negativen Ionen wird durch eine äußere Kraft oder ein elektrisches Feld verstärkt oder abgeschwächt. Die mechanischen, optischen und piezoelektrischen Eigenschaften hängen stark von der Kristallrichtung ab. So zeigen die für technische Anwendungen parallel oder senkrecht zur x-Achse eines Piezokristalls geschnittenen Piezoscheiben bei Anlegen einer elektrischen Spannung unterschiedliche Verformungsvorgänge, die zu einem longitudinalen und transversalen piezoelektrischen Effekt führen, so daß gleichzeitig verschiedene Wellenarten angeregt werden [26, 28]. Als Beispiel für die zu erwartenden Verformungen einer 1 mm dicken Quarzscheibe soll genannt werden, daß eine Anregungsspannung von 1 kV zu einer Dickenänderung von 2 nm führt [28].

Die in Tabelle 4.1 aufgeführten Schallgeber haben kreisförmige schallabstrahlende Flächen. Nach dem Prinzip von HUYGENS geht von jedem Punkt dieser Fläche eine Kugelwelle aus, die sich im Schallfeld je nach Amplitude und Phase überlagern. Im Abstand von der Schallquelle bildet sich ein Nah- und ein Fernfeld aus. Das Nahfeld ist gekennzeichnet von einer gerichteten Schallausbreitung und in dichten Abständen auftretenden Minima und Maxima des Schalldruckes. Der Abstand des letzten Maximums von der Schallquelle wird als Nahfeldlänge  $N$  bezeichnet. Im Fernfeld öffnet sich das Schallbündel unter einem bestimmten Divergenzwinkel  $\delta$ , wodurch eine kegelförmige Ausbreitung der Schallenergie eintritt. Im Fernfeld nimmt der Schalldruck mit  $1/z$  ( $z$  = Raumkoordinate) ab, das Maximum des Schalldruckes liegt auf der akustischen Achse. Aufgrund der in der Baustoffprüfung verwendeten Schallgeberdurchmesser und der entstehenden Wellenlängen treten in der Regel keine Nahfeldlängen mehr auf. Die Berechnung von  $N$  und  $\delta$  erfolgt nach Gleichung (4.1) und (4.2):

$$N = \frac{4r^2 - \lambda^2}{4\lambda} \quad (4.1)$$

$$\sin \delta = \frac{1,2\lambda}{2r} \quad (4.2)$$

Die Schallbündelung ist bei gleicher Frequenz umso größer, je größer der Radius der Schallquelle bzw. bei gleichem Radius, je kleiner die Wellenlänge ist. Punktschallquellen strahlen praktisch in alle Raumrichtungen gleichmäßig ab [26, 28].

Zur Charakterisierung der gesendeten Frequenzen der verwendeten Schallgeber wurden Untersuchungen mit dem bereits im Kapitel 2.1.2 erwähnten Laservibrometer PSV 300 F durchgeführt. Da die Signalerfassung mit einem unabhängigen Meßsystem berührungslos erfolgte, konnten unbeeinflusst von der Schallaufnehmercharakteristik, die Geschwindigkeits- und Wegamplituden im untersuchten Frequenzbereich in longitudinaler Schwingungsrichtung analysiert werden. Bild 4.1 bis Bild 4.3 verdeutlichen die Amplitudenverteilung, die Wegamplitude bei 23,3 kHz am Meßpunkt 53 im Zentrum der Ankoppelfläche (Tastfläche) und eine Momentaufnahme des Schwingungsverhaltens der gesamten Schwingeroberfläche des breitbandigen Schallgebers UPG-D.

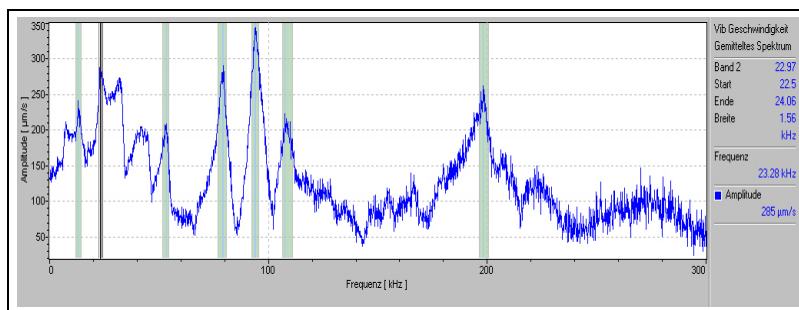


Bild 4.1: Geschwindigkeitsamplituden im Zentrum der Tastfläche des UPG-D, Anregung USG 21 mit 20 kHz

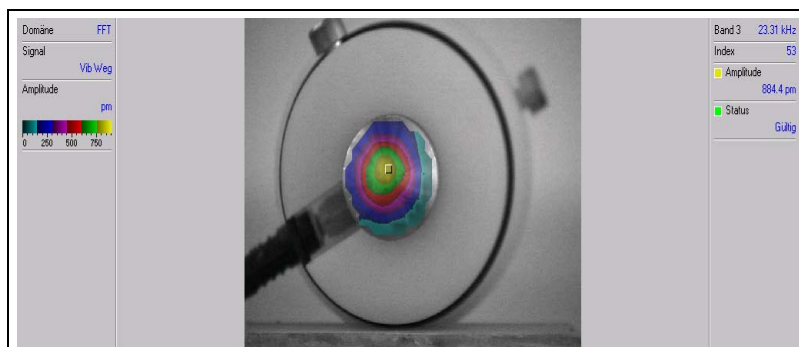


Bild 4.2: Wegamplitude von 884 pm bei einer Frequenz von 23,3 kHz am Meßpunkt 53 des UPG-D

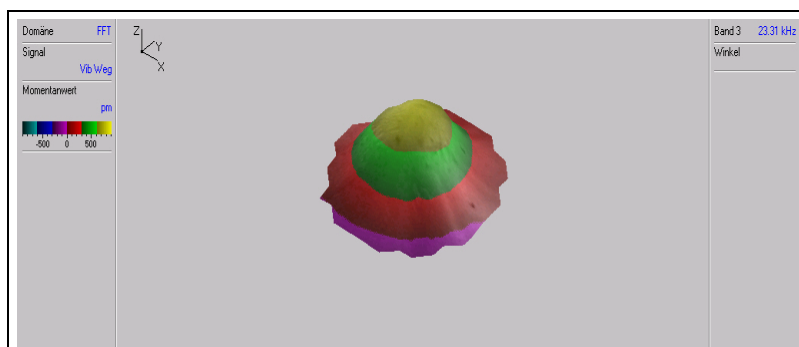


Bild 4.3: Momentaufnahme des Schwingweges bei einer Frequenz von 23,3 kHz

Bild 4.1 belegt, daß die zur Durchführung des Dehnenwellenresonanzverfahrens erforderlichen Wellenlängen für  $v_L$  und  $f_d$  auf der Basis der ermittelten Sendefrequenzen des Schallgebers UPG-D erzeugt werden können (siehe auch Bild 4.20).

Bild 4.4 bis Bild 4.6 zeigen das Frequenzspektrum sowie Momentaufnahmen der visualisierten S-Wellenanregung. Die Frequenzen 31,4 und 38,7 kHz führen zu einer intensiven Anregung der S-Welle.

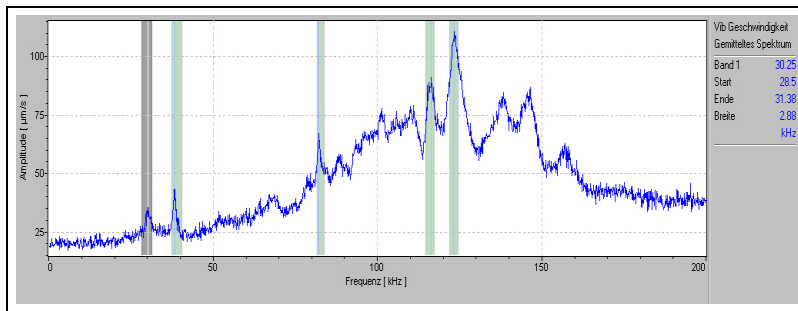


Bild 4.4: Gemitteltes Spektrum der Geschwindigkeitsamplituden des UPG-S, Anregung USG 21 mit 80 kHz

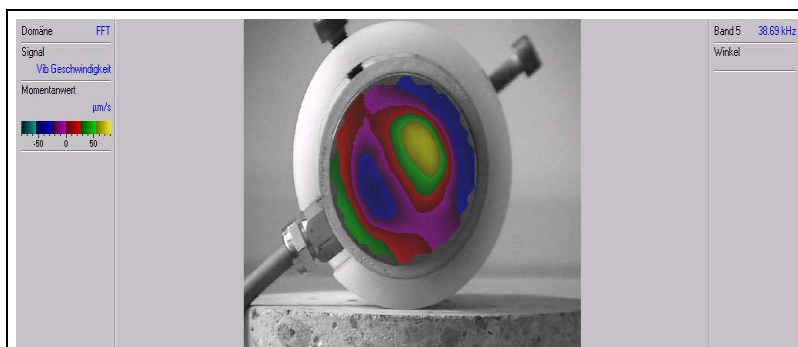


Bild 4.5: Momentaufnahme der Verteilung der Geschwindigkeitsamplituden bei einer Frequenz von 38,69 kHz, Frequenz mit S-Wellenanteil

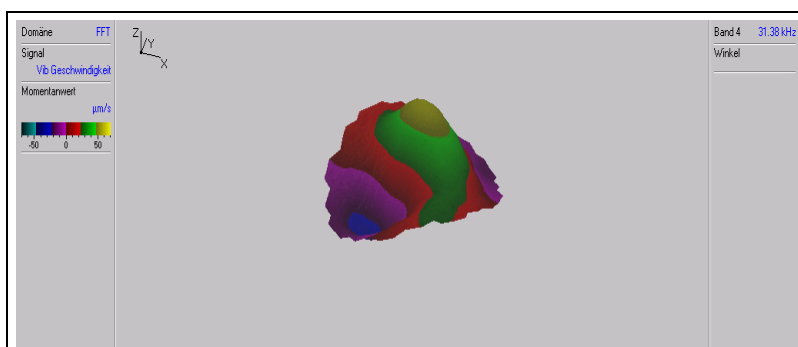


Bild 4.6: Momentaufnahme der S-Wellenanregung bei 31,38 kHz

Bild 4.7 bis Bild 4.8 beinhalten das gesendete, breitbandige Frequenzspektrum des Schallgebers der Tauchsonde TS 250 zur Bestimmung des Hydratationsverlaufes sowie der Erhärtungsdruckfestigkeit.

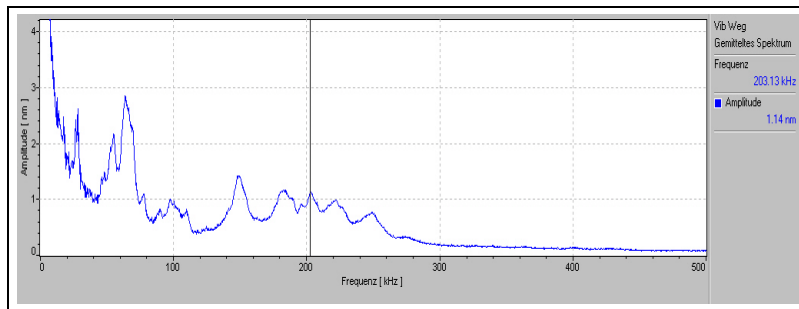


Bild 4.7: Gemittetes Spektrum der Wegamplituden des TS 250, Anregung Ultraschallgenerator CONSONIC 60

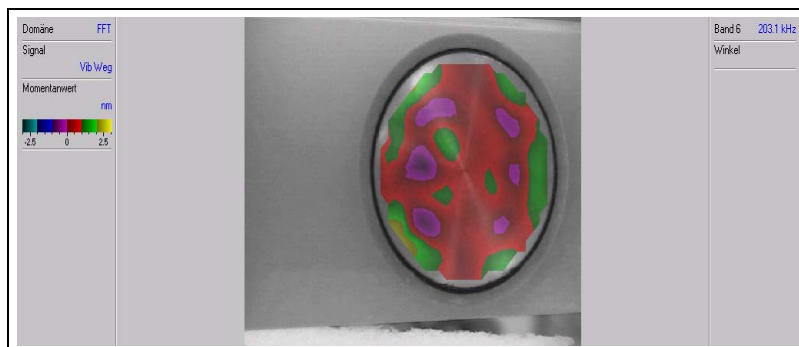


Bild 4.8: Momentaufnahme der Verteilung der Wegamplituden bis  $\pm 1,14$  nm bei einer Frequenz von 203,1 kHz

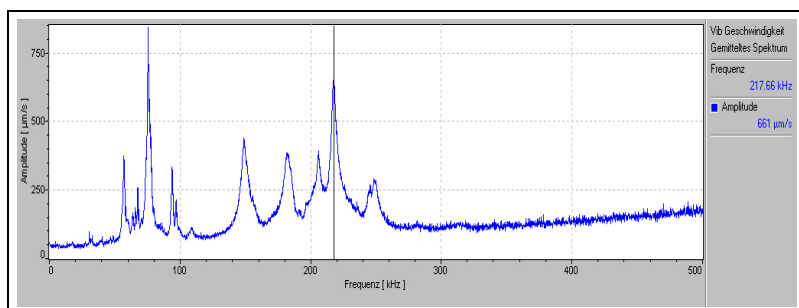


Bild 4.9: Geschwindigkeitsamplituden des UPG 250

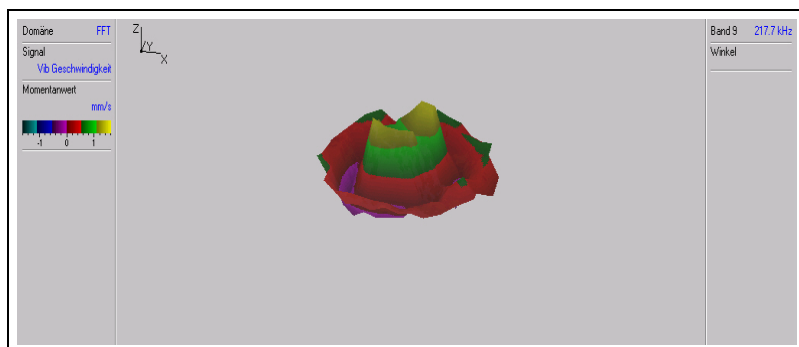


Bild 4.10: Momentaufnahme der P-Wellenschwingung des UPG 250 bei 217,7 kHz

Bild 4.11 und Bild 4.12 zeigen das gemittelte Spektrum der Wegamplituden sowie die bei 118 kHz visualisierte Verteilung der Wegamplituden des modifizierten UPG-D für die Hydratationsversuche im Zementleimbecher. Die Wegamplituden haben ihr Maximum im Frequenzbereich um 100 kHz bei ca. 2 nm.

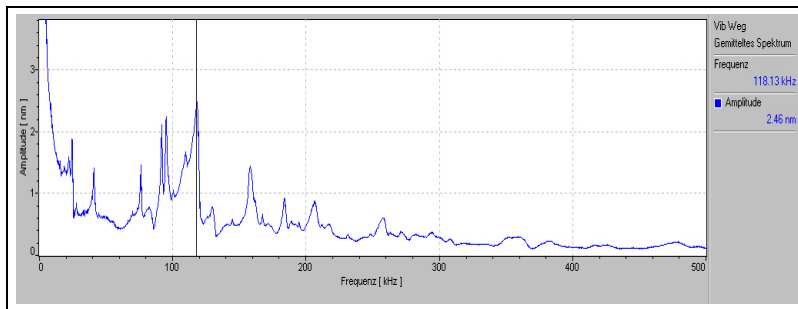


Bild 4.11: Gemitteltes Spektrum der Wegamplituden des UPG-D (modifiz. für ZLB), Anregung Ultraschallgenerator CONSONIC 60

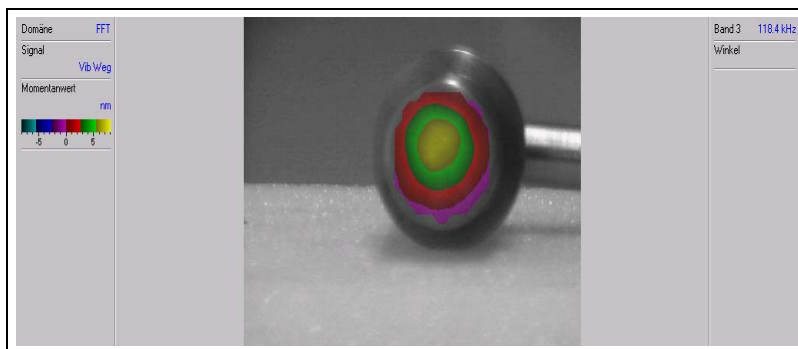


Bild 4.12: Momentaufnahme der Verteilung der Wegamplitude bis 2,2 nm bei 120,0 kHz des UPG-D (modifiz. für ZLB)

Bild 4.13 vermittelt das Spektrum der Wegamplituden des Schallgebers SW 30 mit der dominierenden Wegamplitude bei 26,7 kHz. Dieser Sachverhalt spiegelt sich im Bild 4.14 in der Momentaufnahme der Verteilung der Wegamplituden bei der gleichen Frequenz wider. Der Hochleistungs-Ultraschallgeber, hergestellt in Sandwich-Bauform, führt insgesamt zu deutlich höheren Amplitudenwerten, als die in Bild 4.1 bis Bild 4.12 vorgestellten Schallgeber. Das Frequenzspektrum ist auch aus Bild 2.12 ersichtlich.

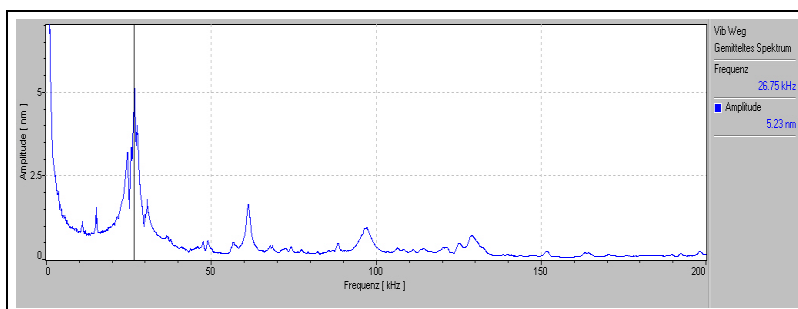


Bild 4.13: Spektrum der Wegamplituden des SW 30, Anregung Ultraschallgenerator CONSONIC 60

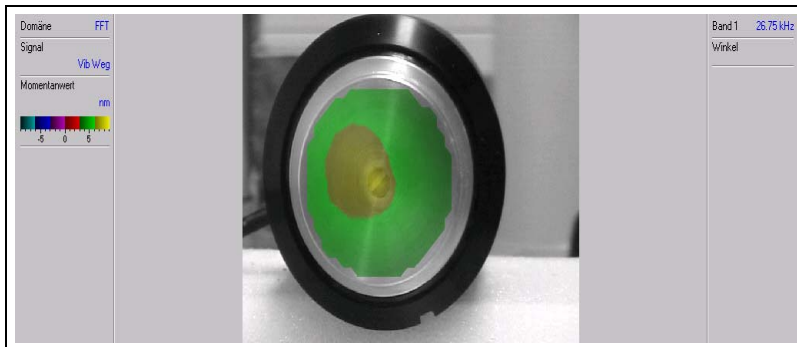


Bild 4.14: Momentaufnahme der Verteilung der Wegamplituden des SW 30 bei der Frequenz 26,75 kHz

Diese Untersuchungen verdeutlichen, welche Frequenzen der untersuchten Schallgeber überhaupt an einer Schallübertragung beteiligt sind, so daß durch die Berechnung der Wellenlängen nach Gleichung (2.1) Aussagen zu den Verhältnissen der Wellenausbreitung (entstehende Wellenart, erreichbare Auflösung) in dem untersuchten Probekörper vorgenommen werden können. Weitere Grundlagenuntersuchungen müssen darin bestehen, die im Bereich des Schallempfängers ankommende Schallwelle berührungslos zu empfangen und hinsichtlich des Frequenzgehaltes und der Schalldruckamplituden zu analysieren.

## 4.2 Schallübertragung in Abhängigkeit vom Ankoppeldruck

### 4.2.1 Ankopplung an festen Probekörpern

Im Kapitel 2.2.1 wurde bereits auf den Einfluß des Ankoppelmittels und -druckes bei der Durchführung von Ultraschallmessungen hingewiesen. Aus Tabelle 4.1 ist ersichtlich, für welche Versuche welche Bauart von Schallgebern verwendet wurden. Ultraschallmessungen zur Erfassung der inneren Gefügeschädigung während der Prüfung des Frostwiderstandes erfolgten mit der Ankoppelvorrichtung UMV 10, um neben einer genauen Positionierung des Probekörpers zwischen dem Schallgeber (UPG-D) und –empfänger (UPE-D) eine reproduzierbare Einstellung des Ankoppeldrucks durch eine digitale Druckanzeige zu ermöglichen (siehe z.B. Bild 2.33). Um den erforderlichen Ankoppeldruck für eine vom Ankoppeldruck unbeeinflusste Impulslaufzeitmessung zu ermitteln, wurden im einstellbaren Druckbereich Versuche an Betonprismen der Abmessungen 80 x 80 x 250 mm<sup>3</sup> mit und ohne des für die Prüfung des Frostwiderstandes erforderlichen Butylbandes (Abdichtband) durchgeführt. Aus Bild 4.15 ist zu erkennen, daß ab einem Ankoppeldruck von 900 bis 1000 mbar (0,09 bis 0,1 N/mm<sup>2</sup>) nur noch sehr geringe Änderungen der Impulslaufzeit in Abhängigkeit vom Ankoppeldruck auftreten, die mit der Digitalisierung der Meßkurve und der verwendeten 8 Bit A/D-Wandlerkarte zu begründen sind. Die Ankopplung am Butylband führt im Bereich eines niedrigen Ankoppeldruckes von 400 bis 800 mbar zu größeren Änderungen, die jedoch in der labortechnischen Anwendung nicht relevant sind. Die Untersuchung von



Baustoffproben geringer Festigkeit (z.B. Putze) ist aufgrund der Einstellung geringer Ankoppeldrücke mit höheren Meßwertschwankungen verbunden.

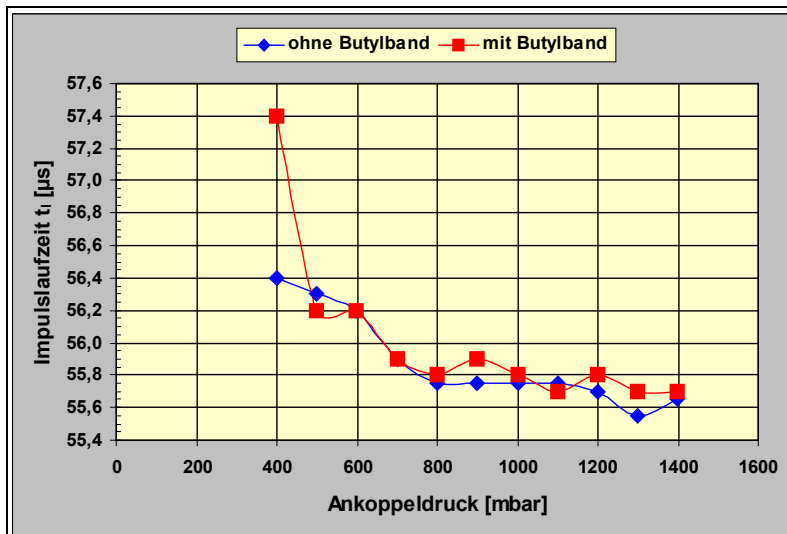


Bild 4.15: Impulslaufzeit in Abhängigkeit vom Ankoppeldruck der Schallwandler UPG-D/UPE-D

Werden Schallgeber mit flächigen Koppelflächen unter Anwendung von Ton angekoppelt, so reduziert sich der Mindestankoppeldruck geringfügig gegenüber der Anwendung von Tastspitzen, um eine vom Ankoppeldruck unbeeinflusste Impulslaufzeitmessung durchführen zu können, Bild 4.17. Die Ankopplung der Schallwandler UPG-D/UPE-D (Kapitel 5.1) erfolgte mit einem Druck von  $1220 \pm 20$  mbar ( $0,12 \text{ N/mm}^2$ ).

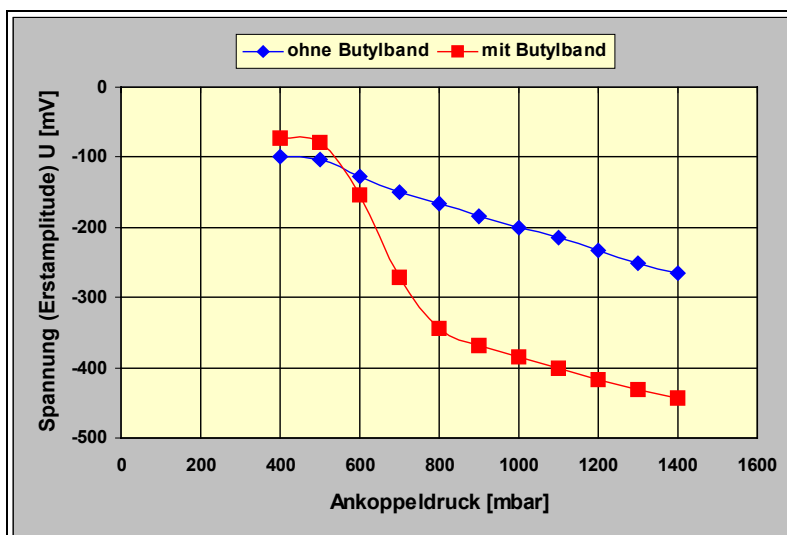


Bild 4.16: Spannungsamplitude in Abhängigkeit vom Ankoppeldruck der Schallwandler UPG-D/UPE-D

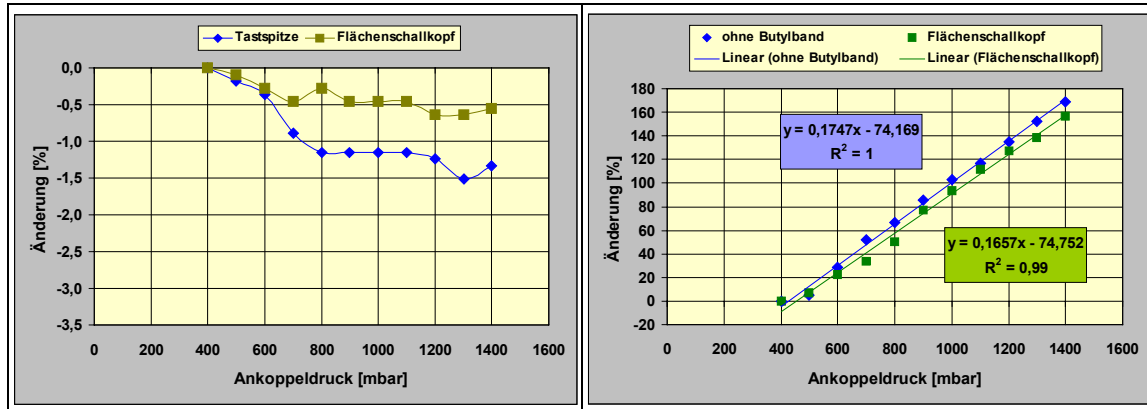


Bild 4.17: Vergleich der Änderung von Impulslaufzeit (links) und Amplitude (rechts) zwischen Tastspitze und Flächenschallkopf (Ankoppelung mit Ton) in Abhängigkeit vom Ankoppeldruck.

Ein anderer Sachverhalt zeichnet sich für eine reproduzierbare Einstellung der Höhe der Erstamplitude ab. Unabhängig von der Bauform des Schallkopfes ist die Änderung der Amplitude in Abhängigkeit vom untersuchten Ankoppeldruck stetig. Ab einem Mindestwert von  $> 800$  mbar besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Amplitudenhöhe und Ankoppeldruck unabhängig von der Bauform der untersuchten Schallwandler und der Ankoppelung mit oder ohne Butylband. Dies bedeutet für die Durchführung von Dämpfungsmessungen, daß bei der Anwendung des UPG-D/UPE-D und einer Ankoppelung auf der Betonoberfläche (Schalfläche ohne Butylband), Bild 4.17 rechts, Änderungen des Ankoppeldruckes von z.B. 20 mbar eine Amplitudenänderung von 3,5 % zur Folge hat.

#### 4.2.2 Ankoppelung an erhärtenden Probekörpern

Gleichbleibende Ankoppelbedingungen während der Erstarrung und eintretenden Festigkeitsentwicklung von Zement, Zementmörtel oder Beton können über einen längeren Untersuchungszeitraum aus folgenden Gründen beeinträchtigt werden:

- Strukturänderungen in den untersuchten Stoffsystemen während der Hydratation,
- Lufteinschlüsse an den Koppelflächen, so daß die übertragene Schallwellenenergie schwankt,
- Schwinden infolge fortschreitender Hydratation.

Punktuelle oder flächige Abrisse an den Koppelflächen können die Folge sein, so daß die Übertragung der Schallwellenenergie durch Störungen oder von einer totalen Unterbrechung gekennzeichnet sein können.

Bild 4.18 zeigt den Zementleimbecher, der für Untersuchungen zur Hydratation von Zementleim und Mörtel mit Ultraschall verwendet wurde. Ausgewertet wurden die Impulslaufzeit und die Höhe der Erstamplitude. Um die genannten Ursachen für Störungen in der Schallübertragung einzuschränken bzw. zu vermeiden, wurden die untersuchten Stoffgemische in der Meßvorrichtung bei eingebauten Schallwandlern auf einem Vibriertisch verdichtet.

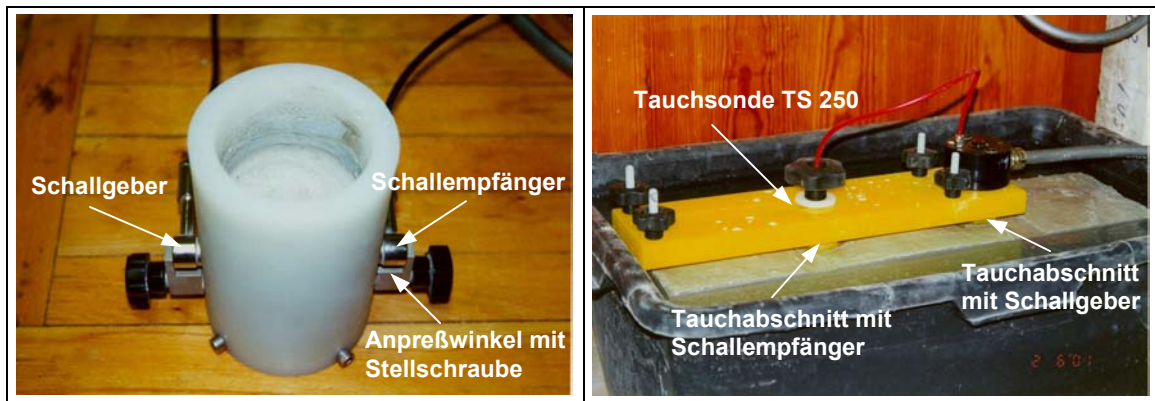


Bild 4.18: Meßvorrichtung zur Untersuchung des Hydratationsverlaufes von Zementleim oder Mörtel

Bild 4.19: Eingesetzte Tauchsonde in einen Beton zur Bestimmung der Erhärtungsdruckfestigkeit

Zusätzlich ist ein Andrücken der Schallköpfe durch entsprechende Anpreßwinkel mit nachstellbarer Handverschraubung möglich. Beeinträchtigungen der Meßwerterfassung bzw. Meßfehler, verursacht durch Feuchtigkeitsverluste, wurden durch die tiefe Lage der Durchschallungsachse und durch eine zusätzliche starre Abdeckung der Meßvorrichtung begegnet. Die Koppelflächen der Schallgeber wurden frei von Ölen und Fetten eingebaut. Erste Hinweise zur erreichten Ankopplung kann der zum Ausbau der Schallwandler notwendigen Kraft entnommen werden. Schwindfreie bzw. schwindarme Stoffgemische führten zu einem stoffschlüssigen Kontakt der Schallköpfe mit dem untersuchten Zementleim bzw. der Mörtelmischung. Da der Anpreßdruck der Schallköpfe während der Messungen nicht verändert wurde, kann der Anstieg der Erstamplitude gleichzeitig zu einer Bewertung der Ankopplung herangezogen werden.

Trotz konstruktiver Maßnahmen zur Entkopplung der Schallköpfe von der Gehäusewand durch Einbau mehrerer Schallübergänge ist Umwegschall, erkennbar an einem hochfrequenten Schwingungsanteil, vorhanden. Bei der Bestimmung von Erstarrungsbeginns und -ende ist dieser Sachverhalt von besonderer Bedeutung. Im Zusammenhang mit den durchgeführten Versuchen zur Festigkeitsentwicklung nimmt diese Thematik jedoch eine untergeordnete Bedeutung ein, so daß an dieser Stelle keine Betrachtungen angestellt werden sollen.

Bild 4.19 verdeutlicht die in einen Betonbalken der Abmessungen  $150 \times 150 \times 700 \text{ mm}^3$  in den verdichteten Frischbeton eingesetzte Tauchsonde TS 250. Die Durchschallungsachse liegt in einer Tiefe von ca. 80 mm. Während der gesamten Untersuchungszeit wurde der Probekörper in Wasser gelagert. Ankoppelmittel wurden generell nicht verwendet. Um die Entformbarkeit der Tauchsonde zu gewährleisten, wurden die Tauchabschnitte der Tauchsonde dünn eingefettet, die Koppelflächen der Schallwandler geringfügig mit Trennmittel eingesprüht. Ausgewertet wurde die Impulslaufzeit in einem Zeitraum bis zu 7 Tagen (siehe Kapitel 5.2).

### 4.3 Berechnung der gerätetechnischen Verzögerungszeiten für direkte Ankopplung

Die Schallgeschwindigkeit wird nach Gleichung (2.20) aus dem Schallweg  $s$  und der Impulslaufzeit  $t_L$  berechnet. Die aus dem digitalisierten Zeitsignal ermittelte Impulslaufzeit ist beeinflusst von einer gerätetechnischen Verzögerung, die durch die Elemente der Meßkette ausgelöst wird. Diese Verzögerungszeit summiert sich aus Einzelwerten, die aus der Anregung des Piezokristalls, der Länge der verwendeten Verbindungskabel, der Dicke des Schallwandlergehäuses im Bereich der Koppelflächen (Bauform) und dem Ankoppelmittel resultieren. Hierbei haben die Bauform der Schallwandler und das Ankoppelmittel den entscheidenden Einfluß. Im Ergebnis wird eine Impulslaufzeit gemessen, die um den Betrag der Verzögerungszeit verlängert ist. Um die Verzögerungszeit (Totzeit) des Meßsystems zu ermitteln, wird die Baustoffprobe gegen ein Vergleichsnorm (Laufzeitnormal) bekannter Impulslaufzeit ausgetauscht. Unter Beibehaltung der Meßbedingungen wird aus dem Differenzbetrag zwischen dem ermittelten Meßwert und dem Kalibrierwert des Vergleichsnormals die Verzögerungszeit bestimmt, die von jedem mit dieser Meßanordnung ermittelten Laufzeitwert subtrahiert wird. Werden Veränderungen in der Meßkette durch Einsatz anderer Ultraschallgeneratoren oder Schallwandler vorgenommen, so muß dieser Wert neu bestimmt werden.

Tabelle 4.2: Impulslaufzeiten der untersuchten Bohrkerne

BK- Nr.	Durchmesser	Schallweg $s$	Impulslaufzeit $t_l$ UPG-D/UPE-D <sup>5</sup>	Impulslaufzeit $t_l$ UPG 250/UPE <sup>6</sup>
	[mm]	[mm]	[ $\mu$ s]	[ $\mu$ s]
1	50,5	24,9	$7,93 \pm 0,06$	$7,50 \pm 0,17$
2	50,5	24,7	$7,23 \pm 0,06$	$7,33 \pm 0,06$
3	50,5	51,0	$13,20 \pm 0,10$	$12,2 \pm 0,06$
4	50,5	101,5	$25,83 \pm 0,15$	$24,50 \pm 0,10$
5	50,5	101,4	$25,67 \pm 0,06$	$24,20 \pm 0,10$
6	50,5	149,5	$36,50 \pm 0,20$	$34,83 \pm 0,06$
7	50,5	200,5	$49,57 \pm 0,25$	$47,63 \pm 0,29$
8	50,5	249,5	$59,87 \pm 0,12$	$58,20 \pm 0,06$
9	50,5	300,5	$73,97 \pm 0,15$	$71,97 \pm 0,06$

<sup>5</sup> USG 21, Anregung 20 kHz, Ankopplung trocken, Mittelwert aus drei Messungen,

<sup>6</sup> USG 21, Anregung 250 kHz, Ankopplung Ton, Mittelwert aus drei Messungen

Dieser Verfahrensweg wird in der Regel für resonante Schallgeber angewendet. Bei breitbandigen Schallgebern (z.B. UPG-D) sollte zusätzlich untersucht werden, ob eine Abhängigkeit der Verzögerungszeit von der Länge des Schallweges besteht. Aus diesem Grund wurden Impulslaufzeitmessungen an unterschiedlich langen Bohrkernen durchgeführt, die einem Beton gleicher Rezeptur und Herstellung entnommen wurden. Tabelle 4.2 vermittelt einen Überblick zu den erzielten Meßwerten. Die A/D-Wandlung erfolgte mit 10 MHz, 8 Bit.

Aus Bild 4.20 ist ersichtlich, daß zwischen Impulslaufzeit und der untersuchten Bohrkernlänge eine lineare Korrelation besteht. Das absolute Glied dieser Funktion weist als Verzögerungszeit einen Wert von  $1,41 \mu\text{s}$  aus. Weiterhin kann aus der linearen Funktion abgeleitet werden, daß die Impulslaufzeit bei einer vergleichbaren Aussteuerung der Erstamplitude (Nachregelung der Verstärkung) unbeeinflußt von den Schallgeberfrequenzen ermittelt werden konnte. Vergleichsmessungen mit dem Laufzeitnormal ( $t_1 = 26,0 \mu\text{s}$ ) ergaben Meßwerte von  $t_1 = 27,28 \pm 0,04 \mu\text{s}$ , so daß die Verzögerungszeit  $1,28 \pm 0,04 \mu\text{s}$  beträgt, die mit dem an den Bohrkernen ermittelten Wert gut übereinstimmt. Erfolgt keine Nachregelung der Erstamplitude für die Bestimmung des P-Welleneinsatzes, so wird der Einfluß der Probekörpergeometrie sichtbar. Mit zunehmendem Schallweg erfolgt eine Amplitudendämpfung und Frequenzverschiebung, Bild 4.21.

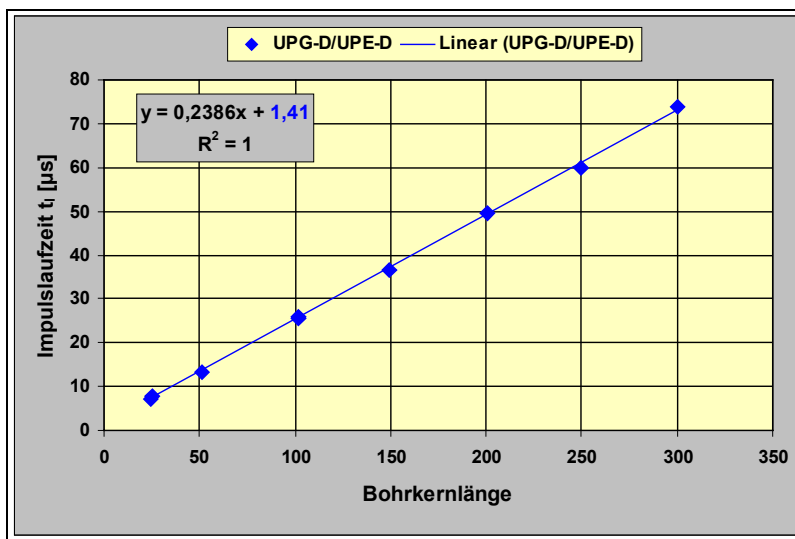


Bild 4.20: Bestimmung der Verzögerungszeit des Schallwandlersystems UPG-D/UPE-D

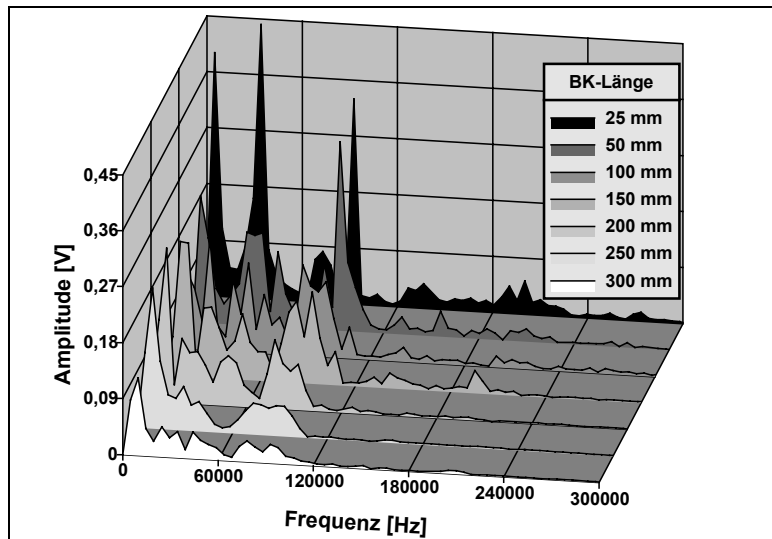


Bild 4.21: Frequenzspektren der untersuchten Bohrkerne ohne Nachregelung der Verstärkung

Bild 4.22 führt bei Anwendung der gleichen Bestimmungsmethode der Verzögerungszeit für die Schallwandler UPG250/UPE zu einem Wert von  $0,94 \mu\text{s}$ , der ebenfalls unter Beachtung der erreichbaren Zeitaufösung gut mit dem am Laufzeitnormal unter gleichen Meßbedingungen ermittelten Wert von  $0,8 \mu\text{s}$  übereinstimmt. Tabelle 4.3 vermittelt einen Gesamtüberblick zu den für die experimentellen Untersuchungen verwendeten Verzögerungszeiten.

Tabelle 4.3: Verzögerungszeiten der verwendeten Schallwandler

Schallwandler	Meßobjekt	Generator	Ankopplung	Verzögerungszeit [ $\mu\text{s}$ ]
UPG-D/UPE-D	Bohrkerne	USG 21	trocken	1,41
UPG 250/UPE	Bohrkerne	USG 21	Ton	0,94
UPG 250/UPE	LZN	USG 21	Ton	0,8
UPG 250/UPE	LZN	USG 21	Fett	0,4
UPG-D (ZLB)	LZN	CONSONIC 60	Fett	0,82
SW 30/PSV 300 F	LZN	CONSONIC 60	Fett	6,6

Die Einbeziehung des Butylbandes in die Bestimmung der Verzögerungszeit der Schallwandler UPG-D/UPE-D ergab keine signifikante Änderung des Wertes von  $1,41 \mu\text{s}$ . Dies kann mit der Beobachtung begründet werden, daß durch den Ankoppeldruck der Tastspitzen das Butylband zusammengedrückt und geringfügige, zu erwartende Laufzeitänderungen durch eine verbesserte Ankopplung ausgeglichen wurden.

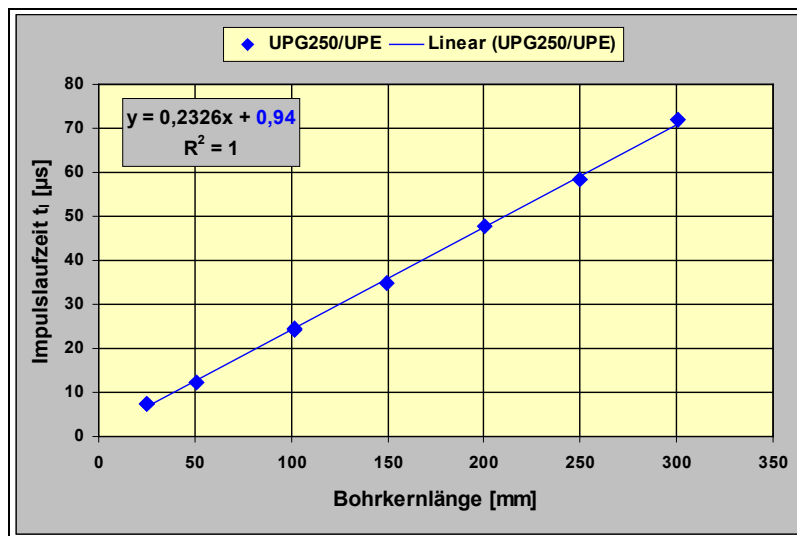


Bild 4.22: Bestimmung der Verzögerungszeit des Schallwandlersystems UPG250/UPE

#### 4.4 Digitalisierung von Zeitsignalen

Die wichtigste Verbindung eines Computers zur analogen Außenwelt stellt ein Analog-Digital-Wandler (A/D-Wandler) her, der analoge Signale einem PC zum Verwalten und Speichern zugänglich macht. A/D-Wandler konvertieren eine als Spannung am Eingang anliegende Größe in einen für den Rechner nutzbaren digitalen Wert. Die analoge Größe muß als Spannungswert bereitgestellt werden. Jede A/D-Wandlung ist hinsichtlich Schnelligkeit oder Genauigkeit mit Kompromissen verbunden. Sie ist auf jeden Fall fehlerbehaftet, da sie nur mit endlicher Auflösung (z.B. 12 Bit-Wandler  $\rightarrow$  4096 Abstufungen des Spannungswertes) erfolgen kann. Trotz Verfeinerung der Auflösung durch Einsatz von 14- und 16-Bit-Wandler kann der Fehler der A/D-Wandlung grundsätzlich nicht beseitigt werden [123]. Um einzelnen Meßwerten im Signalverlauf ihre zeitliche Position eindeutig zuordnen zu können, müssen folgende Forderungen erfüllt werden:

- Das Signal muß in äquidistanten Zeitabständen abgetastet werden
- Die gewählte Abtastfrequenz muß für die Rekonstruktion des Signalverlaufes das *Abtasttheorem* (*Theorem von Shannon*) erfüllen, das heißt, die Abtastfrequenz muß mindestens doppelt so hoch sein, wie die höchste im Signal enthaltene Frequenz, die auch als *Nyquist-Frequenz* bezeichnet wird. Die Nichtbeachtung des Abtasttheorems führt zu *Aliasing* Effekten (Fehlabtastung). Die fehlerhafte Abbildung des Signalverlaufes kann nachträglich in den gewonnenen Daten des digitalisierten Signalverlaufes nicht korrigiert werden. Um unnötig hohe Datenmengen bei prinzipieller Anwendung der höchsten Abtastrate des Meßsystems zu vermeiden, wird durch einen Tiefpaß (*Anti-Aliasing-Filter*) der Frequenzgehalt so begrenzt, daß keine höherfrequenten Signalanteile als die halbe Abtastfrequenz auftreten. Zu beachten ist, daß derartige Filter zu einem Amplitudenfehler und zu Phasenverschiebungen

im Durchlaßbereich führen. Deshalb muß die Übertragungsfunktion des Filters in Abhängigkeit von der Frequenz bekannt sein.

Tabelle 4.4 verdeutlicht die für die durchgeführten Betonversuche verwendete Meßgerätekonfiguration und vorgenommenen Einstellungen zur Signaldigitalisierung:

Tabelle 4.4: Meßgerätekonfiguration, Digitalisierung

	Transientenrecorder PSO 5070		CONSONIC 60
	Impulslaufzeit $t_i$	Resonanzfrequenz $f_d$	Impulslaufzeit $t_i$
Abtastfrequenz	10 MHz	200 kHz	40 MHz
Zeitauflösung	0,1 $\mu$ s	5 $\mu$ s	25 ns
Amplitudenauflösung	8 Bit ( $\rightarrow$ 48 dB)	8 Bit ( $\rightarrow$ 48 dB)	12 Bit ( $\rightarrow$ 72 dB)
Speichertiefe	2 bzw. 4 KByte <sup>7</sup>	4 KByte <sup>8</sup>	32 KByte

## 4.5 Transversalwellen, direkte und indirekte Messung

Durch das Dehnwellenresonanzverfahren wird  $\mu_d$  aus dem Verhältnis der Wellengeschwindigkeiten  $v_D/v_L$  ermittelt und in Gleichung (2.8) zur Berechnung von  $E_{dyn}$  eingesetzt. Die Geschwindigkeit der Transversalwelle (S-Welle)  $v_T$  wird indirekt berechnet. Um die vorhandenen Meßmöglichkeiten zur Bestimmung von  $v_T$  gegenüberstellen zu können, wurden an Betonprismen 80 x 80 x 250 mm<sup>3</sup> Scherwellenwandler der Baureihe UPG-S/UPE-S angepipst und 128 Messungen mit einem Meßintervall von 60 sec ausgeführt, um die Entstehung der S-Welle in einem Zeitraum von 128 Minuten kontinuierlich aufzuzeichnen, Bild 4.23a.

Tabelle 4.5: Vergleich S-Wellengeschwindigkeit aus direkter und indirekter Messung

	Schallweg $s$ [mm]	Impulslaufzeit $t_i$ [ $\mu$ s]	Impulslaufzeit $t_i$ [ $\mu$ s]	Schallgeschw. $v_L$ [m/s]	Schallgeschw. $v_T$ [m/s]	Querdehnzahl $\mu_d$ [-]
UPG-S/UPE-S	253,2 <sup>9</sup>	58,6	93,8	4321	2699	0,18
UPG-D/UPE-D	250,7	58,1	99,5	4302	2519	0,24

Zum Vergleich wurde die Dehnwellenresonanz- und Eigenschwingzeitmessung am gleichen Probekörper durchgeführt.

<sup>7</sup> Standardspeichertiefe 0,5 bis 256 KByte

<sup>8</sup> Spektrale Auflösung 48,8 Hz (Dehnwellenresonanzen im Frequenzbereich: 8 bis 4 kHz)

<sup>9</sup> Schallwandler diagonal angekoppelt [142]



Bild 4.23b verdeutlicht die Lage des Schwingungsbildes (um 90° gedreht) in der grafischen Darstellung, die eine Verknüpfung aller 128 Messungen in einem Signalblock beinhaltet. Tabelle 4.5 enthält die Meßergebnisse der Ultraschallmessungen.

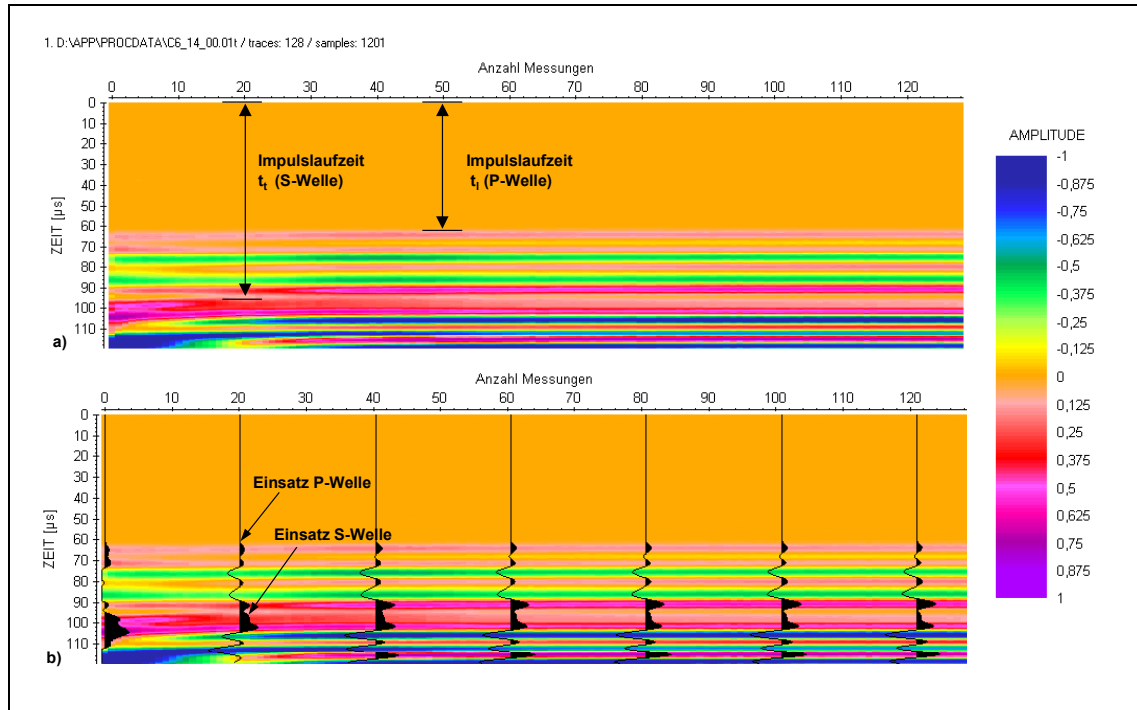


Bild 4.23: P- und S-Wellenmessung mit den Schallwandlern UPG-S/UPE-S, angekippt (a), mit Darstellung des Schwingungsbildes (b)

Unter Einbeziehung der im Kapitel 4.1 ermittelten Frequenzen von 31,4 kHz und 38,7 kHz, die bevorzugt zur S-Wellenanregung führen, würden sich nach Gleichung (2.1) Wellenlängen für  $\lambda_{31,4 \text{ kHz}} = 8,5 \text{ cm}$  und für  $\lambda_{38,7 \text{ kHz}} = 6,9 \text{ cm}$  ergeben. Die Forderung  $s_q \geq 1,5 \lambda (v_T)$  wäre nicht erfüllt und kann bei schlanken Probekörpern auch nicht erfüllt werden. Analoge Verhältnisse entstehen aus den Meßergebnissen der Eigenschwingzeitmessung. Das Verhältnis der ermittelten Frequenzen der Biegewelle zur Torsionswelle  $f_b/f_t$  ergibt ein  $\mu_d = 0,18$  und der Dehnwelle zur Torsionswelle  $f_d/f_t$  ein  $\mu_d = 0,25$ . Hieraus ist die Schlußfolgerung zu ziehen, daß durch den schlanken Probekörper Sonderformen der Transversalwellen (Torsionswellen) entstehen. Die indirekt berechnete Geschwindigkeit  $v_T$  aus dem Verhältnis der Wellengeschwindigkeiten  $v_D/v_L$  durch das Dehnwellenresonanzverfahren entspricht dem Verhältnis der Schwingzeit von Torsionswelle zur Longitudinalwelle (mit Dehnwellenanteilen) im Ergebnis der Eigenschwingzeitmessung [142].

Durch die Geophysik wurden den Änderungen des Verhältnisses  $v_T/v_L$  (dynamische Querdehnzahl) in Abhängigkeit von der Porosität und den Eigenschaften des porenfüllenden Mediums große Bedeutung beigemessen [143, 144] und Modellvorstellungen für Naturstein entwickelt [145]. Am besten untersucht ist der Einfluß der Flüssigkeitssättigung poröser Gesteine auf  $v_L$  und  $v_T$ . Bei geringen Sättigungsgraden bleibt  $v_L$

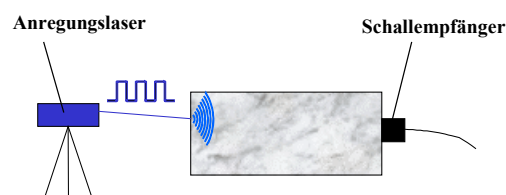
weitgehend konstant und ändert sich mit einem Porenfüllungsgrad von 90 bis 95 % sprunghaft. Die Transversalwellengeschwindigkeit  $v_T$  ändert sich kaum [146, 147], sie reagiert jedoch sensibler auf Gefügeschädigungen als  $v_L$ .

## 4.6 Anregung von Schallwellen mittels Laser

Die experimentellen Versuche zur Anregung von Schallwellen in Baustoffen wurden in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS) Dresden, Dr. Wiedemann und Dr. Panzner, durchgeführt. Die Versuche untergliederten sich in mehrere Etappen, die in den folgenden Kapiteln 4.6.1 und 4.6.2 inhaltlich beschrieben werden.

### 4.6.1 Nachweis der Anregbarkeit von Schallwellen in Baustoffen

Als Anregungslaser wurde ein Blitzlampen gepumpter Festkörperlaser (Laserklasse 4 nach DIN EN 60825-1 [148] angewendet, dessen aktives Medium ein Neodym-YAG-Kristall ist. Als Schallempfänger wurde ein breitbandiger Schwingungsaufnehmer der Bauform UPE der Firma GEOTRON eingesetzt, Bild 4.24. Die Ultraschallsignale wurden mit einem Transientenrecorder, Abtastfrequenz 10 MHz, digitalisiert.



Angeregt wurde mit einer Wellenlänge von 1064 nm. Der Laserstrahl wurde mittels Linse fokussiert und die Laserfleckgröße durch eine Lochblende auf einen Durchmesser von 2 mm reduziert. Die erzeugte Laserenergie betrug 0,2 bis 1,0 J.

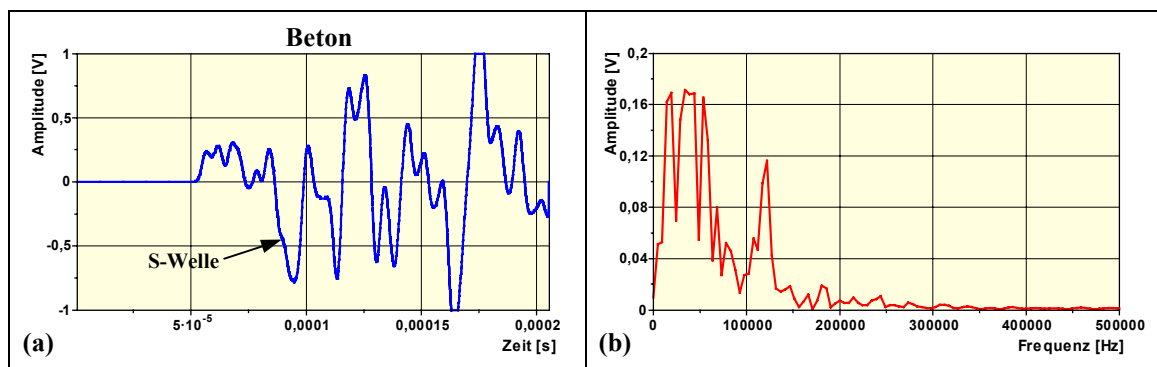
Bild 4.24: Versuchsaufbaus zur Laseranregung (schematisiert)

Tabelle 4.6 verdeutlicht die mit Laser angeregten Schallwellen und die aus den Durchlaufzeiten berechneten Schallgeschwindigkeiten an unterschiedlichen Baustoffen, im Vergleich zur konventionellen Meßmethode. Die aufgetretenen Differenzen resultieren aus den zur Zeit noch nicht präzise ermittelbaren Verzögerungszeiten des Laserverfahrens.

Tabelle 4.6: Vergleich der gemessenen Schallgeschwindigkeiten

Baustoff	Schallweg s [mm]	Laufzeit $t_l$ [ $\mu$ s] <sup>10</sup>	Laufzeit $t_l$ [ $\mu$ s] <sup>11</sup>	$v_L$ [m/s] <sup>10</sup>	$v_L$ [m/s] <sup>11</sup>	Differenz [%]
Beton	250,1	51,5	53,3	4856	4692	3,4
Porenleichtbeton	201,9	106,3	108,2	1899	1865	1,8
Hintermauerziegel	243,7	142,6	137,1	1709	1777	3,8
Vormauerziegel	239,4	84,4	80,9	2836	2959	4,1
Marmor	196,4	31,8	33,0	6191	5966	3,7

Bild 4.25a bis k beinhaltet die digitalisierten Zeitsignale und die Amplitudenspektren (FFT) der untersuchten Baustoffe Beton, Porenleichtbeton, Hintermauerziegel, Vormauerziegel und Marmor. Die Zeitsignale (Bild 4.25a, c, e, g und i) verdeutlichen Amplitudenhöhen des Ersteinsatzes, die mit der konventionellen Anregung (Piezokristalle) vergleichbar sind. Dies steht in Übereinstimmung mit DEUTSCH et al. [28]. Im Bild 4.25a tritt deutlich und gut auswertbar die S-Welle auf. Die Amplitudenverteilung im Ergebnis der FFT (Bild 4.25b, d, f, h und k) vermittelt bei diesem Stand der Untersuchungen (mechanische Ankopplung des Schallempfängers) ein für Baustoffe typisches Übertragungsverhalten im Frequenzbereich bis ca. 120 kHz.



<sup>10</sup> Laufzeitwert aus Laseranregung/UPE, Ankopplung aushärtender Klebstoff

<sup>11</sup> Laufzeitwert aus Vergleichsmessung mit UPG 250/UPE, Ankopplung Ton

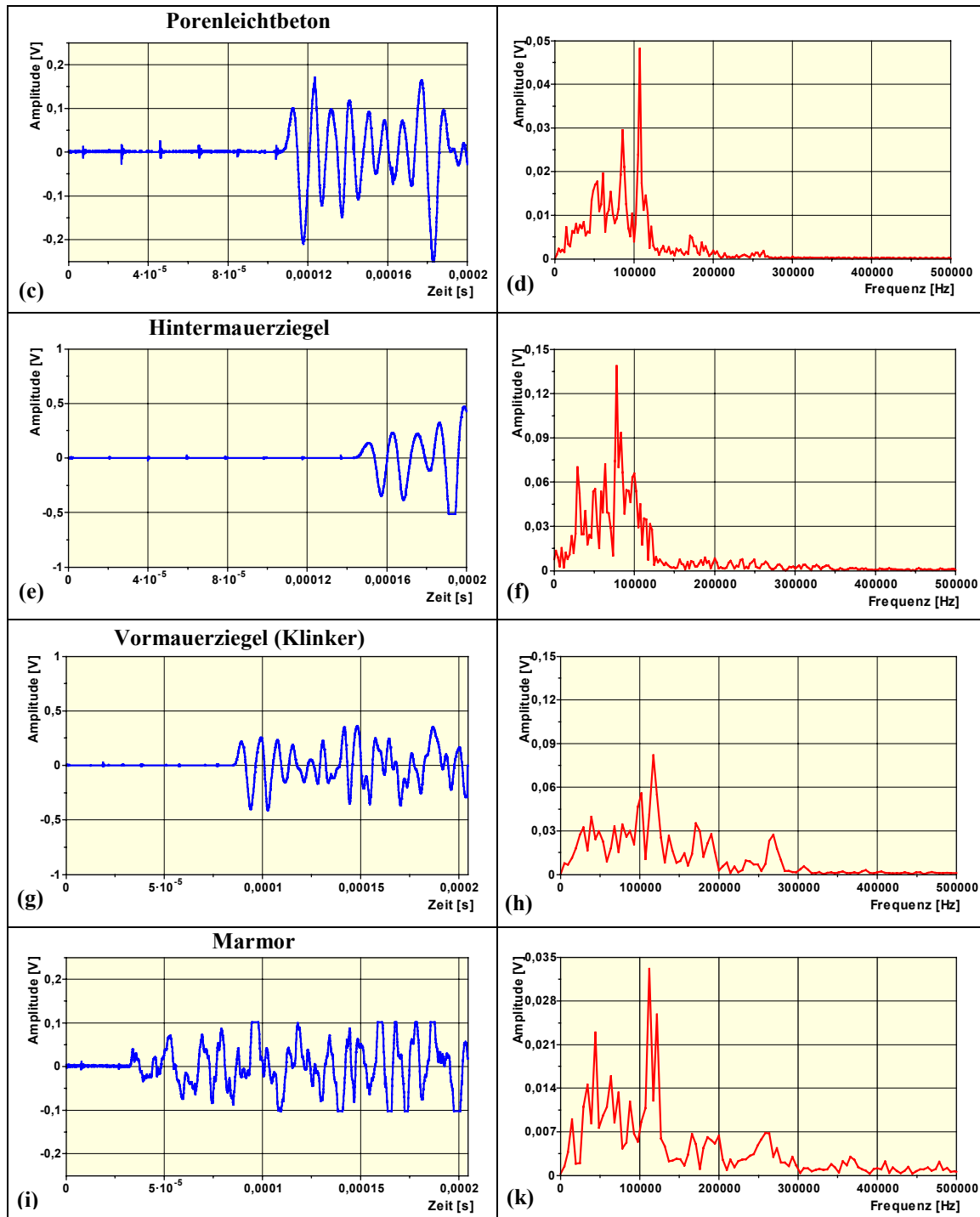


Bild 4.25: Laserinduzierte Schallwellen: Bilder (a), (c), (e), (g) und (i) sowie die jeweils zugehörigen Frequenzspektren: Bilder (b), (d), (f), (h) und (j)

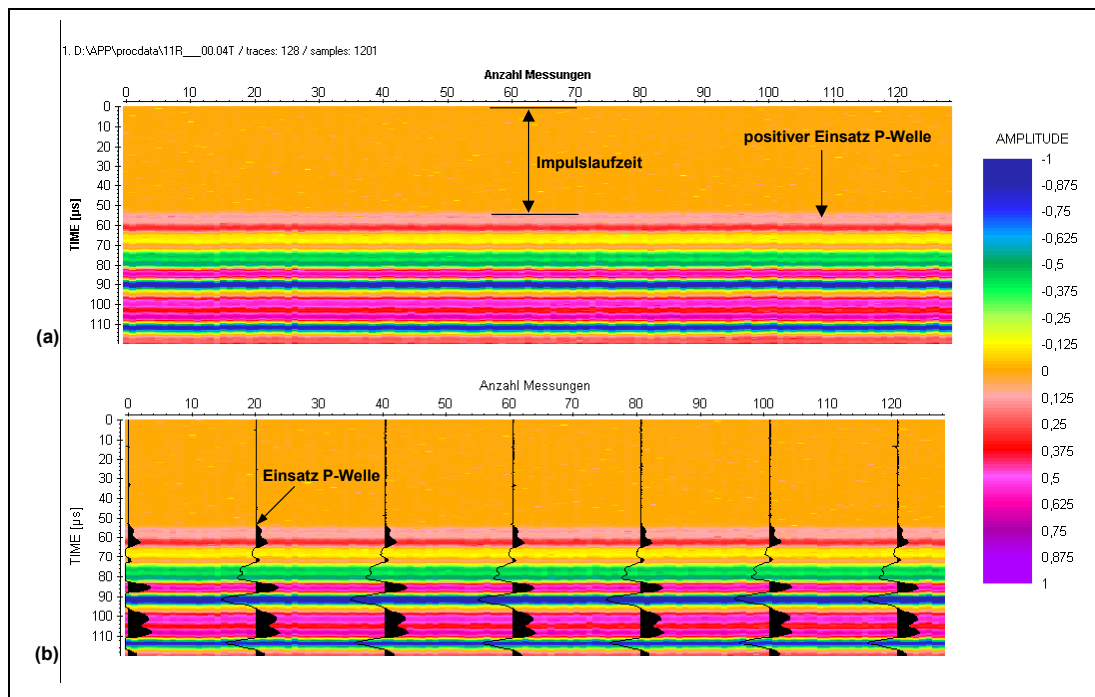


Bild 4.26: Auswirkung der Laser-Pulsanzahl auf die Amplitudenhöhe der P-Welle

Ein weiteres Versuchsziel bestand in der Erfassung der Auswirkungen, inwieweit ein wiederholtes Pulsen mit einem fokussierten Laserstrahl bei einer Pulswiederholfrequenz von 10 Hz auf den gleichen Anregungspunkt der Betonoberfläche zu Änderungen der Höhe der Erstampplitude führt. Dieser Sachverhalt ist für die Durchführung von tomographischen Untersuchungen wichtig, da pro Anregungspunkt ein bestimmter Zeitbedarf zum Scannen aller auszuwertenden Empfängerpositionen (Zeitsignale) besteht. Das Ergebnis ist in Bild 4.26a dargestellt. Zu erkennen ist aus der grafischen Darstellung, die alle 128 Messungen in Folge beinhaltet, daß die Amplitudenhöhe der P-Welle (positiver Ersteinsatz), erkennbar an der durchgehend gleichmäßigen Färbung, nur geringe Änderungen aufweist. Die Amplitudenhöhe, die nachträglich mit einem Transientenrecorder ausgemessen wurde, ergab Änderungen von  $\pm 2$  mV (4 %). Bild 4.26b verdeutlicht die Lage des Schwingungsbildes in der Grafik sowie die Zuordnung der Amplituden zur Legende [149, 150].

#### 4.6.2 Einfluß der Strahlparameter

Um den Einfluß der Strahlparameter auf die Schallanregung zu untersuchen, wurden in einer weiteren Versuchsetappe die Parameter Wellenlänge, Energiedichte und Einfallswinkel des Laserstrahls variiert (Tabelle 4.7).

Tabelle 4.7: Übersicht der Änderungen der Strahlparameter

Versuch	Wellenlänge $\lambda$ [nm]	Energie E [mJ]	Energiedichte $\omega$ [J/cm <sup>2</sup> ]	Strahlführung [-]	Laserfleck $\varnothing$ [mm]
Wellenlänge <sup>12</sup>	355	320	0,50	parallel	9,0
Wellenlänge	532	320	0,42	parallel	9,9
Wellenlänge	1064	320	0,40	parallel	10,1
Energiedichte	1064	240	1,91	fokussiert	4
Energiedichte	1064	240	1,22	fokussiert	5
Energiedichte	1064	240	0,42	fokussiert	8
Einfallswinkel <sup>13</sup>	1064/0°	150	0,76	Blende	5
Einfallswinkel	1064/15°	150	0,73	Blende	5,1
Einfallswinkel	1064/30°	150	0,67	Blende	5,4
Einfallswinkel	1064/45°	150	0,61	Blende	5,6

#### ◆ Wellenlänge

Ausgehend von der Grundwellenlänge von 1064 nm wurde durch Einsatz eines Frequenzverdopplers die 2. harmonische Welle mit der Wellenlänge 532 nm und eines Frequenzverdreifachers mit zusätzlicher Frequenzmischung, die 3. harmonische Welle mit der Wellenlänge von 355 nm zur Grundwellenlänge angeregt. Aus Bild 4.27 und Bild 4.28 ist ersichtlich, daß im Frequenzbereich bis 100 kHz breitbandige Signale entstehen. Der Einfluß der untersuchten Wellenlängen auf den Frequenzgehalt der angeregten Schallwellen wird erst oberhalb von ca. 100 kHz durch Auftreten höherer Frequenzanteile bei der Wellenlänge 1064 nm sichtbar. Inwieweit dieser Effekt signifikant ist, bedarf weiterer Untersuchungen. Geklärt werden muß in diesem Zusammenhang, welche Wechselwirkungen aus der Eindringtiefe der Photonen und der resultierenden Rückstoßkräfte auf den Frequenzgehalt der angeregten Schallwelle bei Baustoffen, insbesondere Beton, besteht. Unter Vernachlässigung des Lichtdruckes (Photonenimpuls) ist in diesem Zusammenhang entscheidend, wie hoch der Anteil der absorbierten Laserenergie beim Auftreffen der Laserstrahlung ist [131, 151].

<sup>12</sup> Toleranz Laserfleckgröße der untersuchten Wellenlängen ca.  $\pm 0,5$  mm

<sup>13</sup> Laserfleckgröße aus zunehmend elliptischer Form berechnet

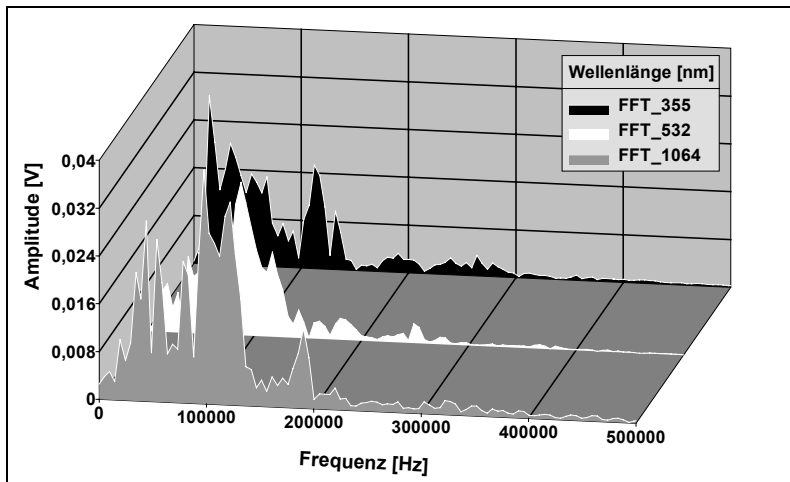


Bild 4.27: Einfluß der Wellenlänge des Laserstrahls auf den Frequenzgehalt der Schallwelle:  
Amplitudenverteilung

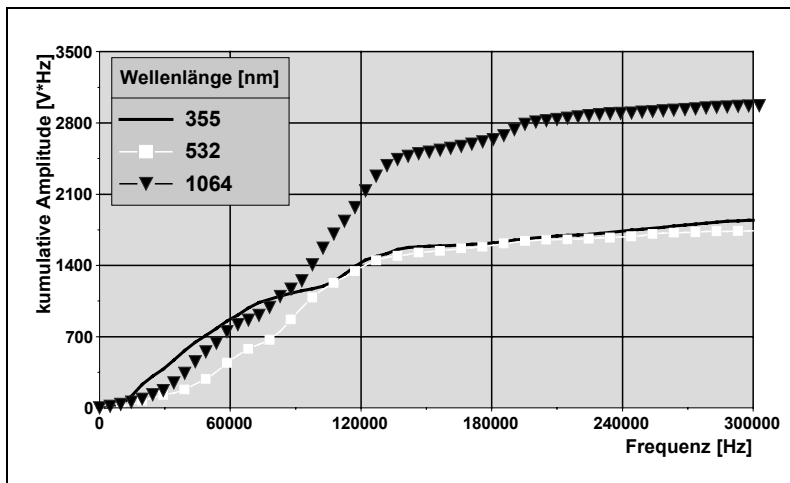


Bild 4.28: Einfluß der Wellenlänge des Laserstrahls auf den Frequenzgehalt der Schallwelle:  
Summation der Amplitudenbeträge

#### ♦ Energiedichte

Der Einfluß der unterschiedlichen Energiedichte des Laserstrahls auf das Frequenzspektrum der angeregten Schallwelle ist Bild 4.29 zu entnehmen. Bei diesen Versuchen wurde bei gleicher Laserenergie (Tabelle 4.7) die Größe des Laserstrahlflecks optisch durch unterschiedliche Abstände zwischen Linse und Betonoberfläche variiert. Der Brennpunkt der Linse lag dabei unterhalb der Betonoberfläche. Mit zunehmender Energiedichte, das heißt mit einer stärkeren Fokussierung der Laserenergie auf eine kleine Fläche, nehmen der Frequenzgehalt und dominierend die Amplituden zu. Der tatsächliche Durchmesser des Laserflecks wurde direkt über der Betonoberfläche mit Fotopapier ermittelt. Die Lichtleistung wurde mit einem Power-Meter gemessen.

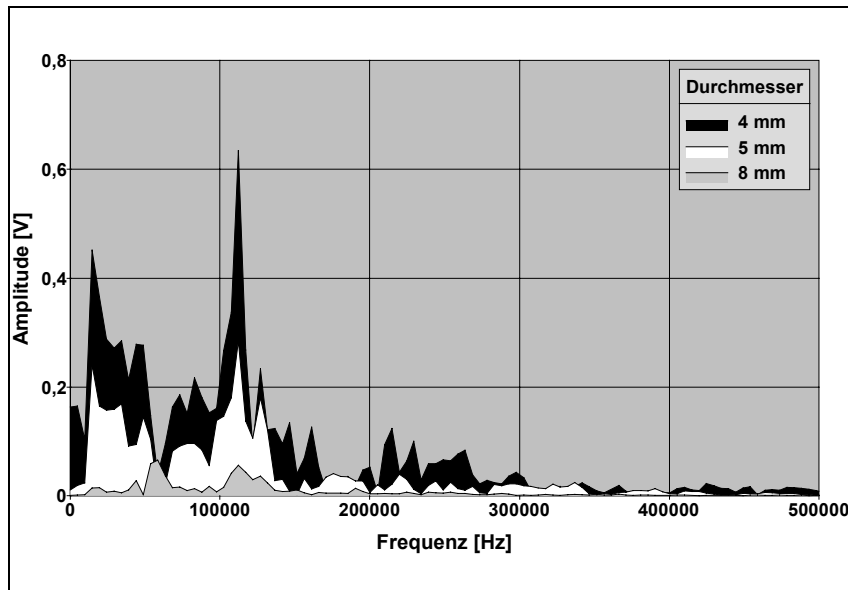


Bild 4.29: Einfluß der Fokussierung (Laserfleckgröße) auf Frequenzgehalt und Amplitudenhöhe

Bild 4.30 zeigt die Amplitudenverteilung in Abhängigkeit von der Lichtleistung des Lasers unter Anwendung einer 5,0 mm Lochblende. Durch die verwendete Blende wurde der diffuse Randbereich sowie ein Teil der Laserenergie (Bild 4.33) des Rohstrahls ausgeblendet. Da das Auftreffen der Laserstrahlung auf die Betonoberfläche im Nahfeld des Laserlichtes stattfindet, ist die Energieverteilung im Laserfleck des durch die Blende geleiteten Laserstrahles vergleichbar mit gleicher Fläche des Rohstrahls [152]. Das Frequenzspektrum bei einer Lichtleistung von 5,3 W entspricht dem Rohstrahl des Lasers. Die Lichtleistung wurde durch die 5 mm-Blende auf einen Wert von 1,6 W reduziert, wodurch bereits eine erhebliche Reduzierung der Amplituden des Frequenzspektrums ausgelöst wurde. Da weitere Abstufungen nicht beliebig eingestellt werden konnten, führten die im Bild 4.30 angewendeten Lichtleistungen zu drastischen Änderungen der Amplituden. Die Abstufung auf eine Lichtleistung von 0,59 W führte zu dem Ergebnis, daß aufgrund des zu hohen Störsignalanteiles keine Auswertung des P-Welleneinsatzes mehr möglich war.



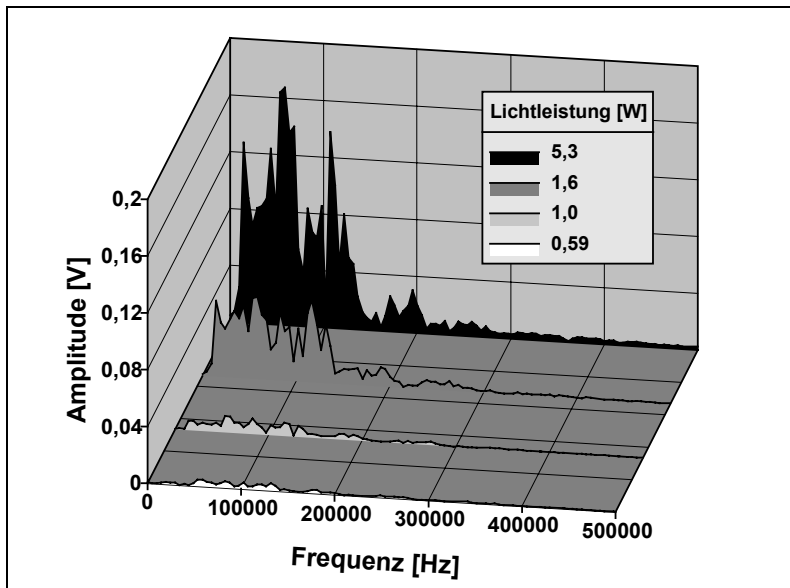


Bild 4.30: Amplitudenverteilung in Abhängigkeit von der Lichtleistung bei konstanter Blende von 5 mm

#### ◆ Einfallswinkel des Laserstrahls

Die Durchführung von Bauwerksuntersuchungen ist von dem Umstand begleitet, daß der Laserstrahl nur in Einzelfällen senkrecht auf die Betonoberfläche auftreffen würde. Der Einfallswinkel des Laserstrahls wurde deshalb durch Kippen des Probekörpers in einem Bereich von 0 bis 45°, mit einer Abstufung von 15°, variiert, die Laserenergie blieb mit 150 mJ unverändert. Bild 4.31 verdeutlicht die Ergebnisse dieser Versuche. Den Frequenzspektren ist zu entnehmen, daß sich der Frequenzgehalt in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Laserstrahls kaum ändert, jedoch die Amplituden aufgrund der abnehmenden Energiedichten (Laserfleckgröße nimmt zu) bei größeren Winkeln deutlich abnehmen.

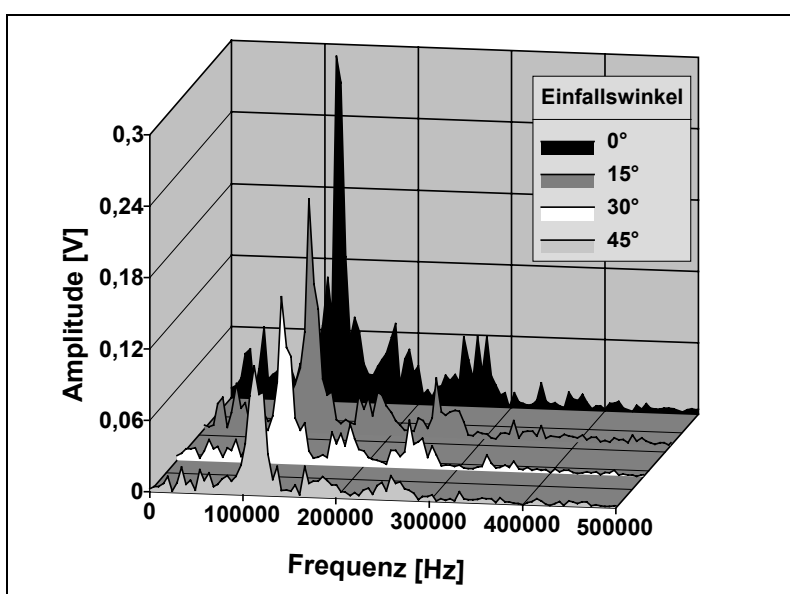


Bild 4.31: Einfluß des Einfallswinkels des Laserstrahls auf die angeregten Frequenzspektren

### ◆ *Einfluß von Feuchtigkeit*

Wird die Betonoberfläche mit Wasser befeuchtet, so tritt durch die explosionsartige Verdampfung des Wassers ein verstärkter Rückstoß auf, der kurzzeitig zu einer Erhöhung der Erstamplitude führt, Bild 4.32. Dieser Effekt der Amplitudenverstärkung ist meßtechnisch nur bedingt nutzbar, da bei der Durchführung von tomographischen Untersuchungen pro Anregungspunkt ein Zeitbedarf zum Scannen der Empfängerpositionen besteht (siehe Erläuterungen zu Bild 4.26).

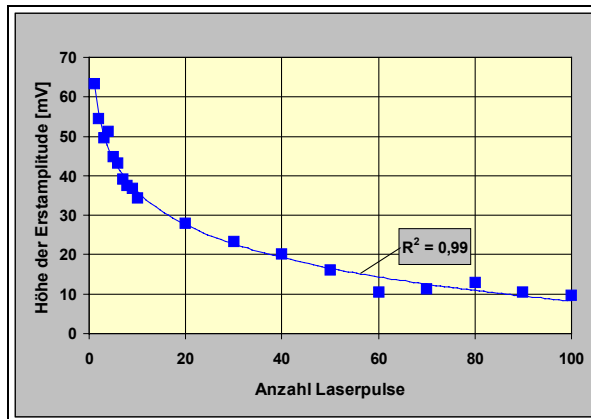


Bild 4.32: Änderung der Erstamplitude bei befeuchteter Betonoberfläche in Abhängigkeit von Laserpulszahl

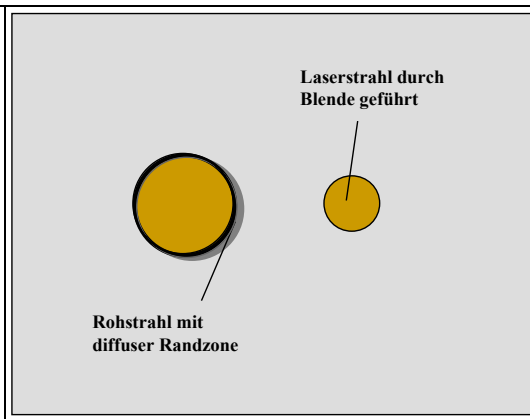


Bild 4.33: Schematische Darstellung des Laserflecks mit und ohne Blende

## 4.7 Erfassung von Schallwellen mittels Laservibrometer

Mit der Inbetriebnahme des Laser-Scanning-Vibrometers PSV 300 F am F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde wurden die Voraussetzungen geschaffen, berührungslos Geschwindigkeits- und Wegamplituden auf Betonoberflächen in einem beliebigen Meßraster zu scannen und dieses zweidimensional darzustellen. Da ein Anregungslaser derzeit noch nicht zur Verfügung steht, mußte die Schallanregung mit einem konventionellen piezoelektrischen Schallgeber vorgenommen werden (siehe schematische Darstellung Bild 4.34 ).

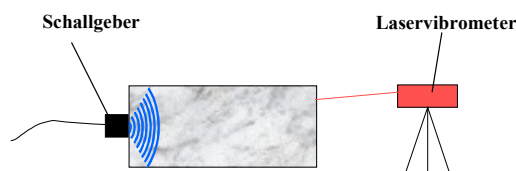


Bild 4.34: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zum Empfang von Schallwellen

Das PSV 300 F gehört zu der Bauart der Einpunkt - Interferometer und ist eine modifizierte Form des Mach-Zehnder-Interferometers. Die Funktionsweise der einzelnen Baugruppen (z.B. Controller, Decoder) ist [136] zu entnehmen.

Im Hochleistungsscankopf befindet sich das Interferometer, die Scanner zum Auslenken des Laserstrahls sowie eine Videokamera zum Visualisieren des Meßobjektes. Der

Scankopf ist auf einem schweren Stativ mit einem motorisierten Schwenk-Neige-Kopf montiert. Mit diesem Stativ kann der Scankopf um  $\pm 90^\circ$  geschwenkt und mit einem Winkel nach oben von  $90^\circ$  und nach unten von  $20^\circ$  (oder umgekehrt, je nach Montage des Scankopfes) geneigt werden. Die maximale Auslenkung der Scanner beträgt horizontal bzw. vertikal  $\pm 20^\circ$ . Die bisher praktizierten Abstände des Scankopfes vom Meßobjekt betragen 1 bis 4 m. Innerhalb der festgelegten Untersuchungsfläche können beliebige Meßpunktabstände gewählt werden. Neben der üblichen Geschwindigkeits- und Frequenzmessung einschließlich FFT-Auswertung an jedem Meßpunkt, erfolgt durch ein Zusatzmodul eine Zeitmessung zur Bestimmung der Schalllaufzeiten. Da die Ultraschallsignale während des Scanvorganges einer automatischen P-Wellenerkennung unterzogen werden müssen, ist das Signal-Rausch-Verhältnis von großer Bedeutung. Dieses ist maßgeblich von den Reflexionseigenschaften der Betonoberfläche abhängig. Bei der Durchführung von Eigenschwingungsmessungen von Bauwerksteilen, die bevorzugt aus größeren Entfernungen durchgeführt werden, müssen zur Verbesserung der Reflexion Spezialfolien auf die Betonoberfläche aufgeklebt werden. Die Unterschiede zwischen einer unbehandelten (z.B. Schalfläche) und einer mit Reflexionsfolie präparierten Betonoberfläche sind Bild 4.35 und Bild 4.36 zu entnehmen.

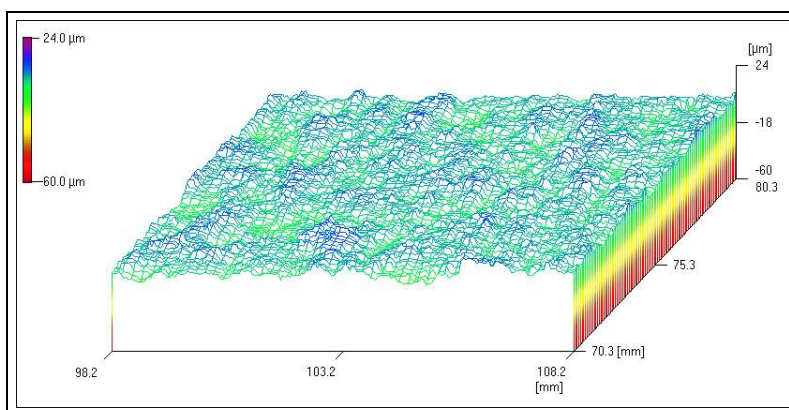


Bild 4.35: Oberflächenbeschaffenheit der Reflexionsfolie, aufgenommen mit dem Lasermikroskop MICROFOCUS, der Firma UBM, unter Anwendung eines Triangulationssensors

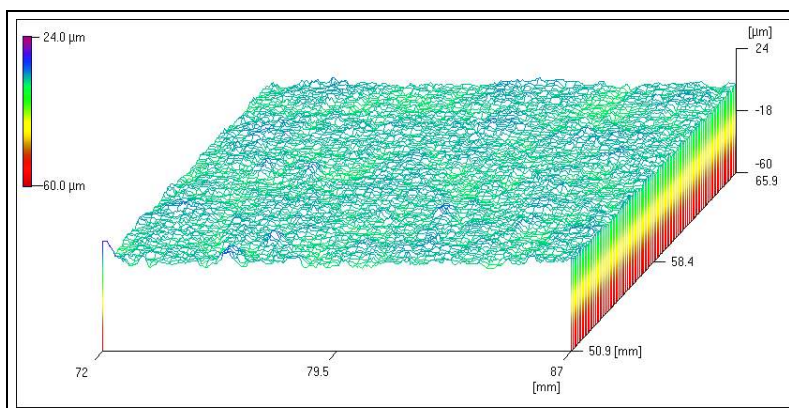


Bild 4.36: Beschaffenheit einer ausgeschalteten Betonoberfläche, aufgenommen mit dem Lasermikroskop MICROFOCUS, der Firma UBM, unter Anwendung eines Triangulationssensors

Die Reflexionseigenschaften von Betonoberflächen sind noch näheren Untersuchungen zu unterziehen. Die Spezialfolien setzen die Absorption des Laserlichtes stark herab und erhöhen den Anteil des reflektierten Laserlichtes, da die vielen kleinen Reflektoren auf der Folie Streulichtanteile erfassen und reflektieren. Als Nachteil dieser Folien ist eine Signaldämpfung zu benennen, die durch die Klebeschicht verursacht wird. Die Betonoberfläche absorbiert das Laserlicht und ist zu glatt. Die Erprobung von Mikroglasskugeln, die auf wasserlöslichen Farben aufgestäubt werden, steht derzeit noch aus.

Zur Steuerung des gesamten Meßablaufes wird das Ultraschallmeßsystem CONSONIC 60 verwendet, welches durch zusätzliche Triggerfunktionen die Zeitmessung sowie die jeweilige Laserposition steuert. Die in diesem Versuchsstadium noch angewendete mechanische Anregung von Schallwellen führte zu auswertbaren Zeitsignalen mit dem Laservibrometer, die Schallwegen im Beton von ca. 0,5 bis 0,75 m entsprechen. Den Meßpunkten im Meßgitter werden, bezogen auf eine Nulllinie, Winkel zugeordnet, aus denen alle Meßpunktkoordinaten berechnet werden können, so daß das zeitaufwendige Einmessen von Meßstellen entfällt. Das im Bild 4.37 dargestellte Datenflußschema verdeutlicht die Meßdurchführung entsprechend Bild 4.34. Die gegenwärtigen Erprobungen beinhalten die Anwendung eines Anregungslasers in Verbindung mit dem Laservibrometer als Schallempfänger. Die Untersuchung der Homogenität von Beton könnte dann ohne Gerüststellung aus Entfernungen bis ca. 10 m erfolgen, mit hoher Meßgeschwindigkeit und Meßpunktdichte.

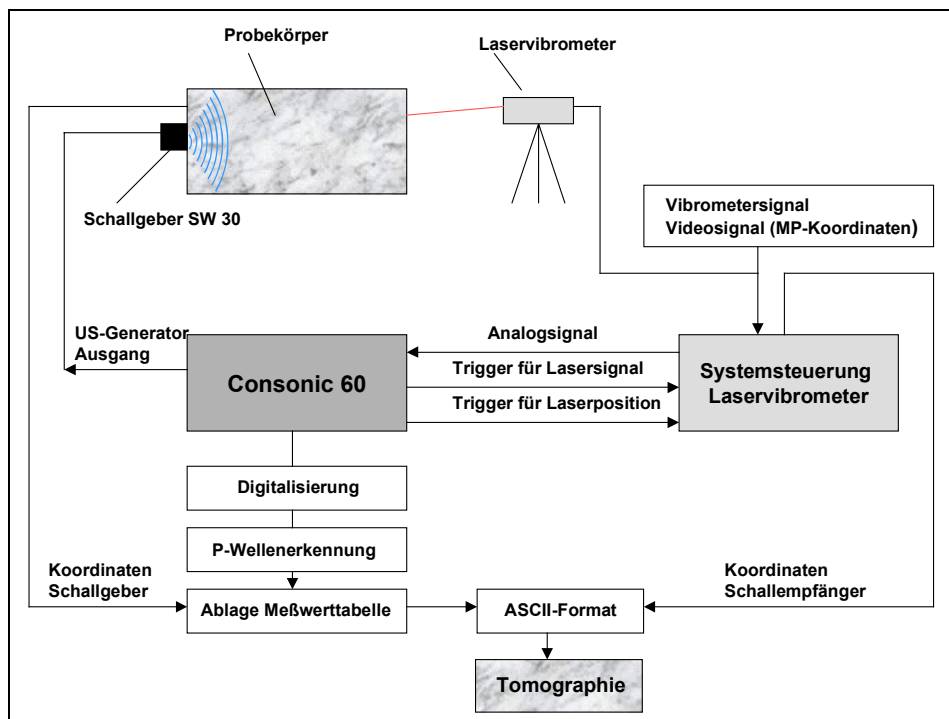


Bild 4.37: Datenflußschema für die Versuchsvariante: Schallanregung konventionell, Schallempfang mit Laservibrometer

## 5 Experimentelle Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit

### 5.1 Prüfung des Frostwiderstandes

Schäden an Bauwerken durch einen Frost- (z.B. Schleusenwände) oder Frost-Tausalz-Angriff (z.B. Betonfahrbahndecken) führten aufgrund der hohen ökonomischen Verluste zu einer intensiven Forschungstätigkeit. Die Entwicklung eines reproduzierbar arbeitenden Prüfverfahrens, welches den einaxialen Belastungsfall realisiert, begann mit den Arbeiten von SETZER und HARTMANN [153, 154, 155]. Vom RILEM TC 117-FDC wurde als RILEM Recommendation [156] die Anwendung des CDF-Testes zur Prüfung des Frost-Tau-Widerstandes unter Anwendung von Taumitteln empfohlen. Die Bewertung des CDF-Testes erfolgt nach 28 Zyklen Frost-Tau-Wechsel unter Verwendung einer 3 %-igen NaCl-Lösung als Prüflösung. Als Abnahmekriterium für die Dauerhaftigkeit wird als Grenzwert eine mittlere Abwitterung von  $1500 \text{ g/m}^2$  angewendet. Zahlreiche Ringversuche belegen die hohe Vergleichs- und Wiederholpräzision, die von AUBERG [10] ausgewertet vorliegen. Parallel zum CDF-Test wird der CF-Test zur Prüfung des reinen Frostwiderstandes angewendet. Diese Testmethode wird verfahrens- und ausrüstungstechnisch analog zum CDF-Test durchgeführt, jedoch wird als Prüflösung demineralisiertes Wasser verwendet. Schwankende Wasserqualitäten (z.B. Leitungswasser) führen zu nicht vergleichbaren Prüfergebnissen [157, 10]. Die Bewertung erfolgt nach 56 Zyklen auf der Basis eines empfohlenen Grenzwertes für die Abwitterung von  $2000 \text{ g/m}^2$ . Zur Bewertung eines Frostschadens ist es jedoch unzureichend, nur die Abwitterungsmenge zu bestimmen, denn niedrige Abwitterungsmengen können mit erheblichen Gefügeschädigungen verbunden sein und umgekehrt können bei hohen Abwitterungsmengen geringe Gefügeschädigungen auftreten. Das RILEM TC 119 beschäftigt sich seit 1997 mit der Problematik, eine praxisrelevante Meßmethode zur Erfassung der inneren Betonschädigung nach erfolgtem Frostangriff zu entwickeln. Als bisheriges Ergebnis wird die Anwendung des CIF-Testes [120] von SETZER et al. [120, 16, 158, 159, 160] und AUBERG [10] als Standardtestmethode empfohlen. Eingang ins Regelwerk fand der CIF-Test bisher nur in die ZTV-W, Leistungsbereich 219 [161]. Der Entwurf der DIN EN 206-1 [7] sieht die Anwendung dieser Prüfmethode für die Festbetonprüfung nicht vor. Ein kompletter Überblick zu den existierenden Frost- und Frost-Taumittel-Prüfverfahren kann LUDWIG [12] und AUBERG [10] entnommen werden. Alle im Kapitel 5.1 dargestellten Untersuchungsergebnisse zum Frostwiderstand wurden auf der Basis der Anwendung des CF-Testes gewonnen, auf dessen Darstellung an dieser Stelle jedoch verzichtet werden soll. Hier sei auf die einschlägige Literatur verwiesen [155, 154, 162, 156, 10].

### 5.1.1 Versuchsplanung, Probekörperherstellung

Die Prüfung des Frostwiderstandes wurde an Normalbetonen durchgeführt. Im Mischungsentwurf zur Betonherstellung wurden die in der Praxis häufig verwendeten Zemente zur Herstellung von Mass beton berücksichtigt, der w/z-Wert und der Einsatz von LP-Mitteln variiert. Die Dosierung des LP-Mittels wurde so vorgenommen, daß sich im Frischbeton Luftgehalte von  $5,5 \pm 0,5 \%$  einstellten. Im Vergleich zur standardmäßig angewendeten Nachbehandlungsdauer von 6 Tagen wurde eine verlängerte Wasserlagerung von 34 Tagen festgelegt. Als Zuschlag wurde für alle Probekörper quarzitisches Rheinmaterial verwendet, das in seiner Kornzusammensetzung dem Sieblinienbereich A/B 16 nach DIN 1045 [5] entspricht und die erhöhten Anforderungen an den Widerstand gegen Frost und Taumittel (eFT) nach DIN 4226 [163] erfüllt. Die gesamte Versuchsplanung ist als Übersicht Bild 5.1 zu entnehmen. Die Untersuchungen zum Frostwiderstand und zur Biegezugfestigkeit erfolgten zu Beginn der Bearbeitung des Versuchsprogrammes an Betonprismen der Abmessungen  $75 \times 75 \times 250 \text{ mm}^3$  auf der Basis der in der eigenen Versuchswerkstatt angefertigten PVC-Formeinsätzen, die in größere Metallbalkenformen eingebaut werden mußten. Die spätere Beschaffung von handelsüblichen 3-fach Metallformen, analog den Metallformen zur Herstellung von Normprismen, erforderte die Anwendung der Geometrie  $80 \times 80 \times 250 \text{ mm}^3$ . Auf diese Geometrieunterschiede wird in der Diskussion der Versuchsergebnisse nur hingewiesen, wenn Auswirkungen auf die erzielten Versuchsergebnisse zu erwarten sind. Die Erfassung der inneren Schädigung wurde entsprechend mit den im Bild 5.17 angegebenen Meßverfahren durchgeführt. Der gewählte Schlankheitsgrad von  $1 : 3,1$  ermöglicht die Durchführung des Dehnwellenresonanzverfahrens und der Eigenschwingzeitmessung. Das Dehnwellenresonanzverfahren wurde gewählt, um aus der gemessenen Impulslaufzeit und der Dehnwellenresonanz Änderungen der Querdehnzahl während der Prüfung des Frostwiderstandes zu berechnen. Die gemessene Eigenfrequenz der Biegewelle soll als eine noch empfindlicher auf Gefügeschädigungen reagierende Meßgröße zum Vergleich herangezogen werden. Vergleichende Betrachtungen werden auch zum CIF-Test, als Standardmeßmethode, vorgenommen. An ausgewählten Versuchsserien wird aus den digitalisierten Zeitsignalen der Eigenschwingzeitmessung der Verlustfaktor berechnet, um die meßtechnischen Möglichkeiten zur Bestimmung der Dämpfung des Baustoffgefüges Beton zu bewerten. Zur Gewinnung von mechanischen Kennwerten wird die Biegezugfestigkeit vor und nach der Frostbelastung ermittelt. Durch Verwendung der gemessenen Impulslaufzeiten in Verbindung mit der jeweiligen Betonrezeptur wird die Druckfestigkeit an jedem Versuchspunkt berechnet. Die Bestimmung der Druckfestigkeit  $\beta_D$  nach DIN 1048, Teil 5 [6] erfolgt an Würfeln der Kantenlängen 150 mm, die als Ausgangswert mit  $\beta_{D(US)}$  verglichen werden.

Das CF-Prüfverfahren wurde entsprechend Prüfvorschrift [120] durchgeführt. Zur Kurzbeschreibung des Versuchsablaufes sollen folgende Vorlagerungsbedingungen zur Durchführung der Prüfung des Frostwiderstandes sowie die Meßintervalle zur Erfassung der inneren Schädigung genannt werden:

- In der Form : 1 Tag
- Nachbehandlung : 6 bzw. 34 Tage
- Trockenlagerung : 21 Tage bei  $T = 20^\circ \text{C}$  / r. F. = 65 %  
(1 Tag vor Beendigung der Trockenlagerung Abdichten der Seitenflächen mit Butylband)
- Vorsättigung : 7 Tage kapillares Saugen mit demineralisiertem Wasser als Prüflösung
- CF-Test : 56 Frost-Tau-Wechsel
- Innere Schädigung : nach 21 Tagen Trockenlagerung, 28-Tage-Wert (ohne CIF-Test)  
: nach kapillarem Saugen  
: nach 14-, 28-, 42- und 56 FTW und  
: nach 21 Tagen Trockenlagerung (ohne CIF-Test)

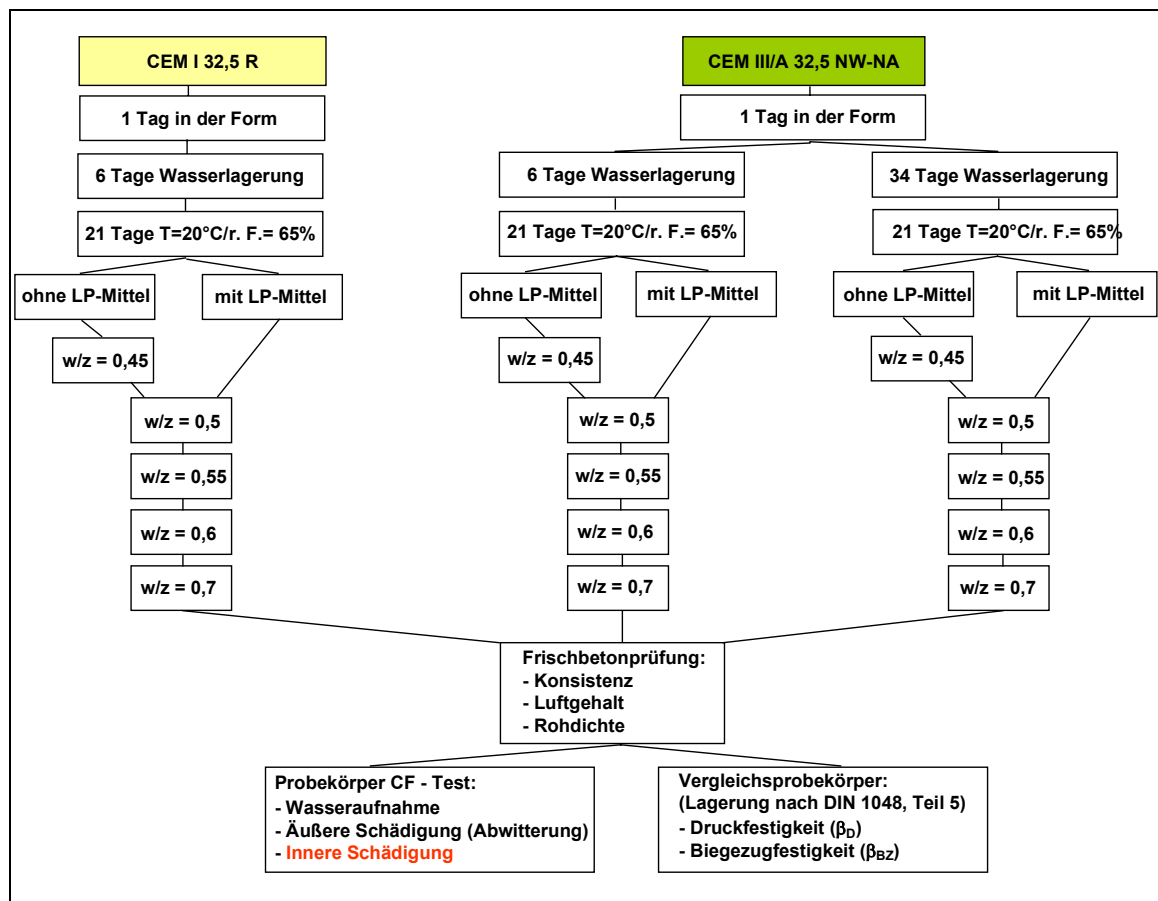


Bild 5.1: Versuchsplan der durchgeführten Betonversuche

### 5.1.2 Probekörperherstellung

Die Herstellung des Frischbetons für alle Versuchsserien erfolgte in einem 40 l Zwangsmischer nach DIN 1048, Teil 1 und Teil 5 [77, 6]. Das Mischregime beinhaltete nach Zugabe von Sand, Zement und Kies eine Trockenmischzeit von 20 Sekunden. Nach Wasserzugabe wurde eine Gesamtmischzeit von 2 Minuten realisiert. Anschließend erfolgte die Bestimmung des Luftgehaltes und 10 Minuten nach Wasserzugabe die Bestimmung der Konsistenz (Ausbreitmaß). Nach lageweisem Einfüllen des Frischbetons in die Metallformen erfolgte das Verdichten auf einem Vibriertisch mit einer Rüttelzeit von 15 Sekunden. Tabelle 5.1 gibt einen Überblick zu den verwendeten Bezeichnungen der Versuchsserien.

Tabelle 5.1: Bezeichnungen der Versuchsserien

CEM I 32,5 R				CEM III/A 32,5 NW-NA							
Serie	w/z-Wert	LP-Mittel	NB [d]	Serie	w/z-Wert	LP-Mittel	NB [d]	Serie	w/z-Wert	LP-Mittel	NB [d]
U	0,45	ohne	6	A_6	0,45	ohne	6	A_34	0,45	ohne	34
V	0,5	ohne	6	R_6	0,5	ohne	6	R_34	0,5	ohne	34
W	0,55	ohne	6	B_6	0,55	ohne	6	B_34	0,55	ohne	34
PS	0,6	ohne	6	S_6	0,6	ohne	6	S_34	0,6	ohne	34
PT	0,7	ohne	6	G_6	0,7	ohne	6	G_34	0,7	ohne	34
LI	0,5	mit	6	LD_6	0,5	mit	6	LD_34	0,5	mit	34
LX	0,55	mit	6	LF_6	0,55	mit	6	LF_34	0,55	mit	34
LY	0,6	mit	6	LS_6	0,6	mit	6	LS_34	0,6	mit	34
LZ	0,7	mit	6	LT_6	0,7	mit	6	LT_34	0,7	mit	34

### 5.1.3 Frischbetonkennwerte

Die ermittelten Frischbetonkennwerte sind in Tabelle 5.3 für den verwendeten Zement CEM I 32,5 R dargestellt. Der Luftgehalt liegt bei den Betonen ohne Zusatz von LP-Mitteln mit 2,2 bis 2,6 % über den Durchschnittswerten von 1,7 bis 2 % mit dem Konsistenzbereich KR (42 bis 48 cm) außer der Serie U, die der Konsistenz KP (35 bis 45 cm) entspricht. Die LP-Betone zeigen ebenfalls einen leicht überhöhten Luftgehalt mit Werten zwischen 6,0 bis 6,4 %. Alle Versuchsserien liegen im Konsistenzbereich KF (49 bis 60 cm). Nach LOHMEYER [46] beträgt der Anteil an Verdichtungs-poren bei einem sachgerecht verdichteten Beton 1 bis 2 % je m<sup>3</sup> Beton. Auf die LP-Bildung wirken unterschiedliche Einflußfaktoren, wie z.B. Kornform des Zuschlages, Mischzeit, Mischintensität und Verdichtungsparameter. Bezogen auf den Zuschlag entstehen hohe



Luftgehalte durch den Anteil des Feinstzuschlages mit der Korngröße  $> 0,125 < 1,0$  mm sowie durch das Rundkorn des Grobzuschlages.

Tabelle 5.5 und Tabelle 5.7 beinhalten die Frischbetonkennwerte auf der Basis des CEM III/A 32,5 NW-NA. Die Versuchsserien der Betone ohne LP-Mittel ergaben einen Luftgehalt im Bereich von 1,7 bis 2,3 % und liegen im Konsistenzbereich KP. Der Luftgehalt der LP-Betone liegt generell im angestrebten Bereich von  $5,5 \pm 0,5$  %. (Mindestluftgehalt nach DIN EN 1045-2 [164] bei einem Größtkorn der Zuschläge von 16 mm:  $> 4,5$  V.-%). Alle Versuchsserien sind dem Konsistenzbereich KF zuzuordnen.

Zur Kontrolle der Luftporenkennwerte werden der Gesamtluftgehalt durch Anwendung des Druckausgleichsverfahren (LP-Topf) am Frischbeton und der Teilluftporengehalt  $L_{300}$  (Mikroluftporen  $\leq 300$   $\mu\text{m}$ , Anteil  $\geq 1,5$  V.-% [79]) sowie der Abstandsfaktor AF ( $< 0,20$  mm) am Festbeton (Dünnschliff) bestimmt [46]. Bei LP-Betonen beträgt  $\text{AF} \leq 0,20$  mm, der  $L_{300}$ -Gehalt  $\geq 1,8$  V.-% [79].

#### 5.1.4 Festbetonkennwerte

Als Festbetonkennwerte wurden die Biegezug- und Druckfestigkeit bestimmt. Die Ergebnisse der Biegezugprüfung werden im Zusammenhang mit der Bewertung der inneren Schädigung des Betongefüges vorgestellt. Die nach DIN 1048/Teil 5 [6] ermittelten Druckfestigkeiten dienen der Bewertung, ob die entsprechend dem Mischungsentwurf zu erwartenden Festigkeiten realisiert wurden. Eine Prüfserie bestand aus drei Würfeln, deren Einzelwerte als Mittelwert berechnet wurden. Die Mittelwerte der Druckfestigkeiten der einzelnen Versuchsserien in Abhängigkeit vom w/z-Wert sind für den CEM I 32,5 R im Bild 5.2 und für den CEM III/A 32,5 NW-NA im Bild 5.3 dargestellt (siehe auch Tabelle 5.5 und Tabelle 5.7).

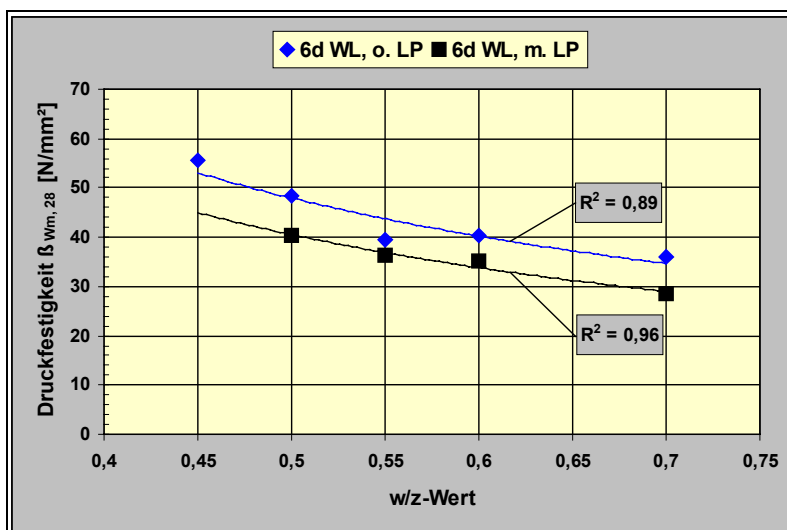


Bild 5.2: Druckfestigkeit  $\beta_{wm,28}$  (28d-Wert) in Abhängigkeit vom w/z-Wert der Versuchsserien mit CEM I 32,5 R

Entscheidende Einflußgrößen auf die Druckfestigkeit  $\beta_{wm}$  sind die Zementart (Festigkeitsklasse), der w/z-Wert, der Luftgehalt und die Nachbehandlungsdauer, wobei der w/z-Wert eine herausragende Stellung einnimmt. Die Bewertung der erzielten 28d-Werte der Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom w/z-Wert für die untersuchte Zementfestigkeitsklasse 32,5 nach WALZ [165, 166] führt zu dem Ergebnis, daß alle Druckfestigkeiten bei einer Nachbehandlungsdauer von 6 Tagen Wasserlagerung die erforderlichen Mindestwerte übertreffen. Die verlängerte Nachbehandlung von 6 auf 34 Tage Wasserlagerung des CEM III/A 32,5 führt zur Einordnung der Druckfestigkeiten in die Festigkeitsklasse 42,5.

Der Abfall der Druckfestigkeit durch das künstlich eingeführte Luftporensystem wird mit 1,5 bis 2 N/mm<sup>2</sup> pro Prozent Luftgehalt angegeben [46, 167]. Die durchschnittliche Erhöhung des Luftgehaltes aller Versuchsserien liegt bei 3,9 V.-%. Dies würde einer Festigkeitsminderung von 5,8 bis 7,8 N/mm<sup>2</sup> entsprechen. Die Differenzbeträge der Versuchsserien des CEM I 32,5 R liegen im Bereich von 3,4 bis 8 N/mm<sup>2</sup> und die des CEM III/A 32,5 NW-NA im Bereich von 3,5 bis 7 N/mm<sup>2</sup>. Die Differenz der Versuchsserie LD mit 9,1 und LT mit 11 N/mm<sup>2</sup> übersteigen die genannte Literaturangabe. Eine detaillierte Erörterung der Einflußfaktoren auf die Festigkeitsentwicklung soll im Kapitel 5.2 vorgenommen werden, die für die Untersuchung des Hydratationsverlaufes verwendeten Zementarten sind identisch und stammen vom gleichen Hersteller.

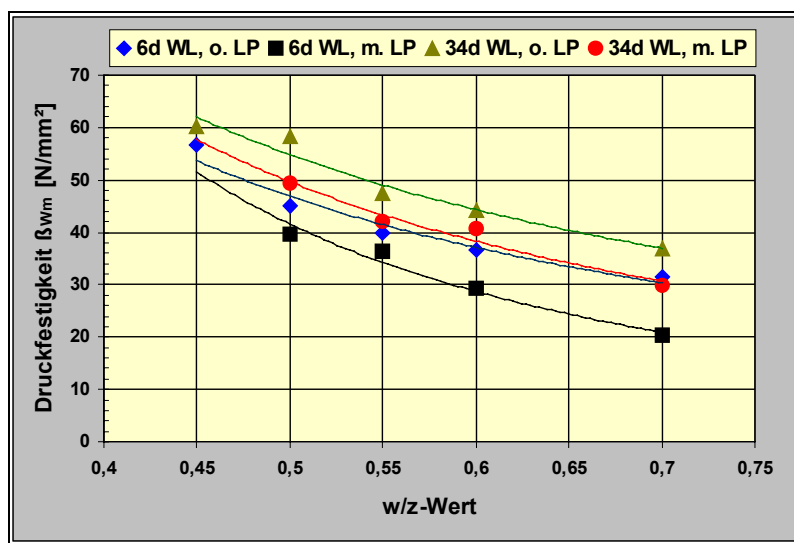


Bild 5.3: Druckfestigkeit  $\beta_{wm, 28}$  in Abhängigkeit vom w/z-Wert und der Nachbehandlungsdauer der Versuchsserien mit CEM III/A 32,5 NW-NA

### 5.1.5 Wasseraufnahme

In Bild 5.4 bis Bild 5.7 sind die Wasseraufnahme der Probekörper während des kapillaren Saugens (KS) und der Prüfung des Frostwiderstandes (56 FTW) dargestellt.

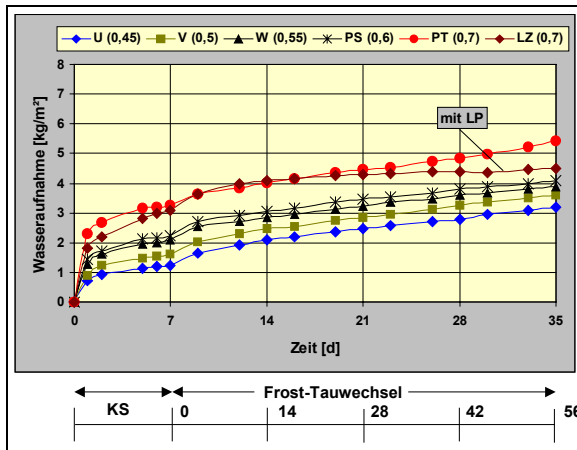


Bild 5.4: Wasseraufnahme der Versuchsserien mit CEM I 32,5 R ohne LP-Mittel

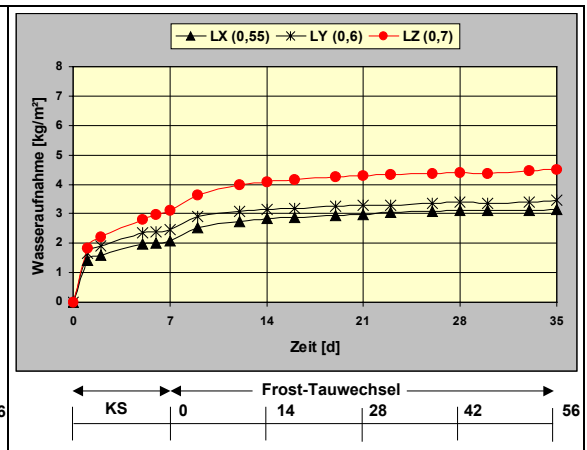


Bild 5.5: Wasseraufnahme der Versuchsserien mit CEM I 32,5 R mit LP-Mittel

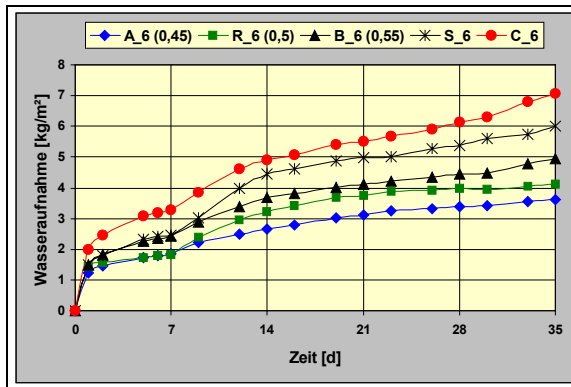


Bild 5.6: Wasseraufnahme der Versuchsserien mit CEM III/A 32,5 NW-NA ohne LP-Mittel

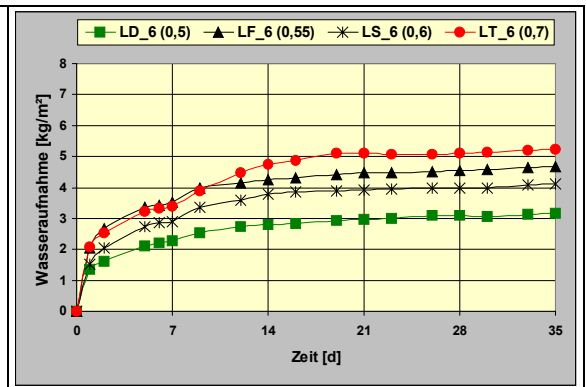


Bild 5.7: Wasseraufnahme der Versuchsserien mit CEM III/A 32,5 NW-NA mit LP-Mittel

Die Kurvenverläufe können wie folgt diskutiert werden:

- ◆ Es stellt sich nach 1 Tag und nach 7 Tagen kapillarer Wasseraufnahme ein spezifischer Sättigungsgrad ein. Dieser ist von der Kapillarporosität, das heißt vom Anteil der Makro- und Mesokapillarporen abhängig (siehe Poreneinteilung Tabelle 5.2) und steht somit im direkten Zusammenhang zum w/z-Wert. Der höchste Anstieg in der Wasseraufnahme ist innerhalb der ersten 24 Stunden zu beobachten.
- ◆ Die ersten Frost-Tau-Wechsel führen zu einem erneuten Anstieg der Wasseraufnahme, die mit den Wirkmechanismen der Mikroeislinsepumpe nach SETZER [16] beschrieben werden kann (siehe Kapitel 2.1.1). Es werden Porenräume gesättigt, die nicht kapillar saugen können (z.B. Verdichtungsporen, künstliche Luftporen). Im weiteren Verlauf der Prüfung erfolgt eine kontinuierliche Wasseraufnahme mit Zuwachsraten, die ebenfalls vom w/z-Wert abhängig sind und bei hohen w/z-Werten zu einer kritischen Wassersättigung führen. Dies ist zu erkennen

an der Wasseraufnahme der Versuchsserie PT, S\_6 und G\_6. Bei den LP-Betonen ist nach dem erneuten Anstieg der Wasseraufnahme während der ersten FTW ein zunehmendes Abflachen des Kurvenverlaufes zu beobachten, das heißt, die Zuwachsraten werden geringer und die Wasseraufnahme kommt nahezu zum Stillstand. Dies verdeutlicht der Vergleich der Kurvenverläufe der Versuchsserien PT und LZ im Bild 5.4, die Versuchsserie LZ geht ab dem Meßpunkt 14 FTW in einen nahezu geradlinigen Verlauf über. Im Bild 5.5 sind die Versuchsserien der hergestellten LP-Betonen mit CEM I 32,5 R dargestellt.

Tabelle 5.2: Einteilung der Poren nach SETZER [164]

Porentyp	Porengröße	Besonderheiten	Art des Porenwassers
Grobporen	$R_H \geq 1\text{mm}$	Leer	Kein
Makrokapillarporen	$R_H < 1\text{mm}$	Saugend sofort befüllbar, Gefrierpunkt bis $-20\text{ }^\circ\text{C}$ laut RGB	Freies, makroskopisches Wasser hoher Beweglichkeit
Mesokapillarporen	$R_H < 30\mu\text{m}$	Saugend in Minuten bis Wochen befüllbar, Gefrierpunkt bis $-20\text{ }^\circ\text{C}$ laut RGB	Freies, makroskopisches Wasser mittlerer Beweglichkeit
Mikrokapillarporen	$R_H < 1\mu\text{m}$	Kein makroskopisches Gleichgewicht, Gefrierpunkt bis $-20\text{ }^\circ\text{C}$ laut RGB	Freies, makroskopisches Wasser geringer Beweglichkeit
Mesogelporen	$R_H < 30\text{nm}$	Befüllt durch Kondensation bei 50 % - 98 % relativer Feuchte, Gefrierphasenübergänge bei $-24\text{ }^\circ\text{C}$ , $-31\text{ }^\circ\text{C}$ und $-39\text{ }^\circ\text{C}$	Vorstrukturiertes kondensiertes Wasser
Mikrogelporen	$R_H < 1\text{nm}$	Befüllt durch Sorption bei $< 50\text{ }%$ relativer Feuchte, Gefrierphasenübergang bei $-90\text{ }^\circ\text{C}$	Strukturiertes Oberflächenwasser

Im Bild 5.8 und Bild 5.9 werden die während des kapillaren Saugens und der 56 FTW zusätzlich aufgenommenen Wassermengen unter Einbeziehung der Zementart und der Dauer der Nachbehandlung abgebildet. Auf den Anstieg der Wasseraufnahme mit zunehmendem w/z-Wert wurde bereits hingewiesen. Die CEM III/A- Betone mit 6 Tagen Nachbehandlung und 21 Tagen Trockenlagerung (Standardfall) führen zu den höchsten Wasseraufnahmewerten. Der Hüttensandgehalt der untersuchten CEM III/A- Betone liegt laut Herstellerangabe bei  $57 \pm 2\text{ }%$ . Untersuchungen von LUDWIG [12] belegen, daß ab einem Hüttensandgehalt von  $> 55\text{ }%$  signifikante Änderungen der Kapillarporosität eintreten. Durch die Karbonatisierung von C-S-H-Phasen entsteht hochporöses Kieselgel. AUBERG [10] gibt als kritischen Wert für die Erhöhung der Kapillarporosität einen Hüttensandgehalt  $> 58\text{ }%$  an. Die verlängerte Nachbehandlung mit 34 Tagen Wasserlagerung setzt in diesem Zeitraum die Karbonatisierungsgeschwindigkeit auf eine zu vernachlässigende Größe herab und verdichtet durch fortschreitende Hydratation das Betongefüge, so daß eine niedrigere Kapillarporosität zu einer erheblichen

Reduzierung der gesamten Wasseraufnahme führt. Bei CEM I - Betonen tritt in der Karbonatisierungszone eine Gefügeverdichtung ein, die geringere Wasseraufnahmewerte gegenüber CEM III/A-Betonen mit vergleichbarer Nachbehandlungsdauer zur Folge haben. Das bei der Hydratation der Portlandzement-Klinkerphasen gebildete  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  wird auf direktem Wege in das stabile  $\text{CaCO}_3$  umgewandelt. Entscheidend ist neben dem Einfluß der Karbonatisierung in der Randzone des Betons, welche Kapillarporosität im Betongefüge in Abhängigkeit vom Hydratationsgrad zu Beginn des kapillaren Saugens und somit in Folge für die Prüfung des Frostwiderstandes erreicht wird. Nach LUDWIG [12], STARK und WICHT [3] liegt bei Portlandzementen nach 28-tägiger Normlagerung ein Hydratationsgrad von 85 bis 90 % vor. Hochofenzemente erlangen unter gleichen Lagerungsbedingungen je nach Reaktivität des Zementes einen Hydratationsgrad von 30 bis 65 %. Ein Hydratationsgrad von 50 % kann infolge des dichteren Betongefüges bereits den langsameren Hydratationsfortschritt der Hochofenzemente gegenüber Portlandzementen kompensieren.

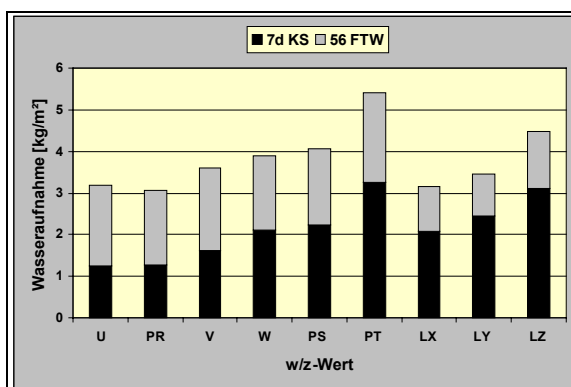


Bild 5.8: Wasseraufnahme während KS und 56 FTW der CEM I- Betone

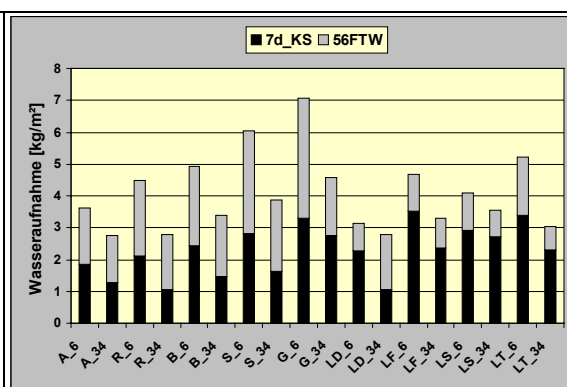


Bild 5.9: Wasseraufnahme während KS und 56 FTW der CEM III/A- Betone

### 5.1.6 Abwitterung

Beton als poröser Baustoff nimmt während der Prüfung des Frostwiderstandes entsprechend des kapillar aktiven Porenanteils eine spezifische Menge Wasser auf. Eine zusätzliche künstliche Sättigung wird durch die FTW-Prüfung ausgelöst. Dadurch werden in Abhängigkeit von der aufgenommenen Wassermenge als Funktion der Dichte der Betonoberfläche und der Verteilung durch Transportvorgänge im Gefüge Oberflächenschädigungen und innere Gefügeschädigungen verursacht. Bei einem reinen Frostangriff müssen beide Schadensbilder betrachtet werden, da keine Korrelation zwischen der äußeren und inneren Schädigung besteht, wobei die letztere als dominierend zu betrachten ist. Um Prüfergebnisse mit hoher Präzision und Trennschärfe zu erzielen, müssen die Prüfbedingungen, die zu einer materialspezifischen Wassersättigung führen, genau definiert vorliegen. Festlegungen der Prüfparameter, wie Art der Prüflösung, die Anzahl der FTW, die Gefrierate, die Minimaltemperatur, die Dauer des Gefrierens sowie die Prüffläche (einaxialer Angriff) sind unerlässlich [120].

In den Untersuchungsergebnissen spiegeln sich die gewonnenen Erkenntnisse der Forschung zur Aufklärung der Schadensursachen im Abwitterungsverhalten von CEM I- und CEM III-Betonen wider [12, 3]. CEM I- Betone sind unter den angewendeten Vorlagerungsbedingungen in der Randzone gekennzeichnet durch eine dünne Karbonatisierungsschicht, die aufgrund der Volumenzunahme bei der Reaktion des Portlandzements zum stabilen Calcit durch eine geringere Kapillarporosität gekennzeichnet ist als der nicht karbonatisierte Kernbereich. Durch diese Karbonatisierungsschicht wird die Wasseraufnahme erschwert. Die Folge ist eine geringe Anfangsabwitterung mit einem progressiv ansteigenden Abwitterungsverlauf nach Abwitterung der verzögernd wirkenden Karbonatisierungszone. Im Bild 5.10 ist dieser Sachverhalt nur an den Versuchsserien PS und PT eindeutig erkennbar. Der Einfluß des w/z-Wertes wird durch eine höhere Wasseraufnahme und geringere Betonfestigkeiten wirksam. LP-Mittel reduzieren die Wirkung des kapillarporöseren nicht karbonatisierten Kernbereiches des Betons und führen zu einer erheblichen Minderung der mittleren Abwitterungsmengen bei den genannten w/z-Werten 0,6 und 0,7 der Versuchsserien LY und LZ, Bild 5.11. Der Übergang zu einer stärker fortschreitenden Abwitterung ist hier nach 42 FTW erkennbar. Alle Versuchsserien liegen deutlich unter dem nur für die ZTV-W, LV 219 [161] zutreffenden Bewertungskriterium von 2000 g/m<sup>2</sup>.

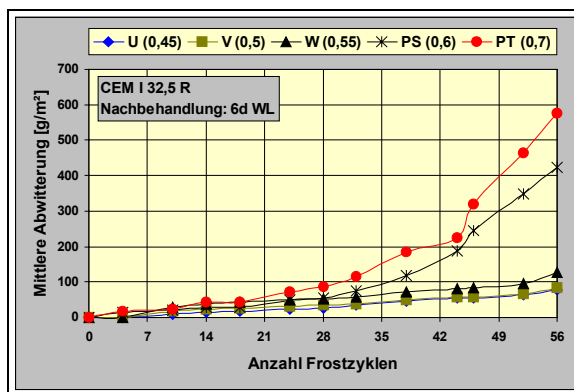


Bild 5.10: Abwitterungsverlauf während 56 FTW, Versuchsserien ohne LP-Mittel

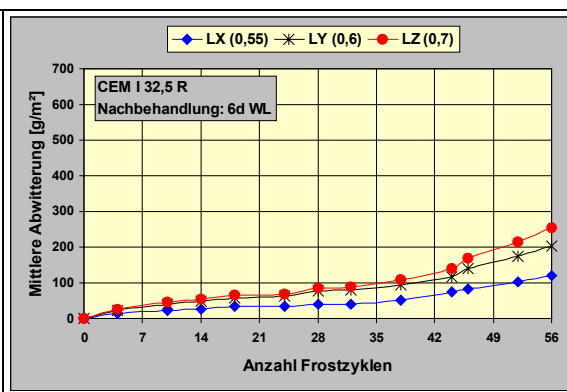


Bild 5.11: Abwitterungsverlauf während 56 FTW, Versuchsserien mit LP-Mittel

Das Abwitterungsverhalten der CEM III- Betone ist tendenziell gegenläufig dem der CEM I- Betone. Mit zunehmenden Hüttensandgehalten entsteht - ausgelöst durch die Karbonatisierung - eine kapillarporöse Randzone, die in einen dichten, nicht karbonatisierten Kernbereich übergeht. Der dadurch initiierte Abwitterungsverlauf besteht bei Betonen mit hohen Hüttensandgehalten in einer hohen Anfangsabwitterung, die sich nach Abwitern der Karbonatisierungszone in einem degressiven Verlauf mit verminderten Abwitterungsraten fortsetzt. Bei diesen Betonen korreliert die Karbonatisierungstiefe mit der Abwitterungstiefe, die am Knickpunkt der Abwitterungskurve erreicht wird [10]. Taumittellösungen, insbesondere niederprozentige NaCl-Lösung, verhindern den Reaktionsablauf zum stabilen Calcit, der immer über die instabilen CaCO<sub>3</sub>-Modifikationen Vaterit → Aragonit abläuft. Taumittellösungen verursachen eine hohe Löslich-

keit dieser metastabilen Karbonatphasen und verhindern die Bildung von stabilem Calcit [12]. LP-Mittel reduzieren nur die Abwitterungsrate des nicht karbonatisierten Kernbereiches. Dieser Abwitterungsverlauf tritt in dieser eindeutigen Form nur bei Verwendung von Tausalzlösungen auf. Der reine Frostangriff führt bei CEM III-Betonen, auch bei hohen Hüttensandgehalten (CEM III/B), zu keiner erhöhten Anfangsabwitterung. Vorversuche an CEM III/B-Betonen mit und ohne LP-Mittel, die nach dem CF- und CDF-Test 28 FTW/FTSW befrosten wurden, belegen diese Aussage, Bild 5.12.

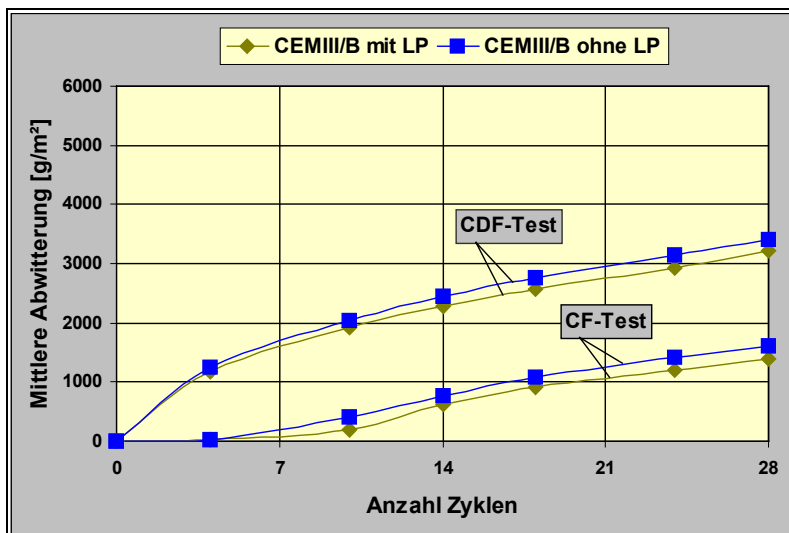


Bild 5.12: Vergleich der Abwitterungsverläufe von Hochofenzementen

Die Abwitterungsverläufe im Bild 5.13 verdeutlichen diesen Sachverhalt. Sie gleichen denen der CEM I-Betone. Die Versuchsserien S\_6 und G\_6 heben sich durch einen starken Anstieg der Abwitterungskurve zwischen 18 und 24 FTW von den Versuchsserien A\_6, R\_6 und B\_6 ab. Die Verwendung von LP-Mittel führt bei den genannten Versuchsserien mit hohen w/z-Werten zu einer Reduzierung der Abwitterungsraten, das heißt zu einem insgesamt flacheren Verlauf der Abwitterungskurven, Bild 5.15. Die Lage des Knickpunktes in den Abwitterungskurven, mit dem Übergang zu einer höheren Abwitterungsrate, bleibt nahezu erhalten. Die verlängerte Nachbehandlung mit 34 Tagen Wasserlagerung (die in der Praxis nicht realisierbar ist) führt zu einer drastischen Reduzierung der Abwitterung. Die Abwitterungskurven verlaufen in Abhängigkeit vom w/z-Wert flach mit nahezu stetigen Zuwachsraten, Bild 5.14. Der durch die verlängerte Wasserlagerung höhere Hydratationsgrad führt zu einem insgesamt dichteren Betongefüge, wodurch die Karbonatisierungsgeschwindigkeit in der anschließenden Trockenlagerung reduziert und die Aufnahme von gefrierbarem Wasser während des kapillaren Saugens, als auch während der FTW vermindert wird. Zwischen dem Hydratationsgrad der CEM III-Betone und dem Frostwiderstand besteht ein linearer Zusammenhang [3]. Die Verwendung von LP-Mitteln führt zu keinen signifikanten Änderungen, Bild 5.16.

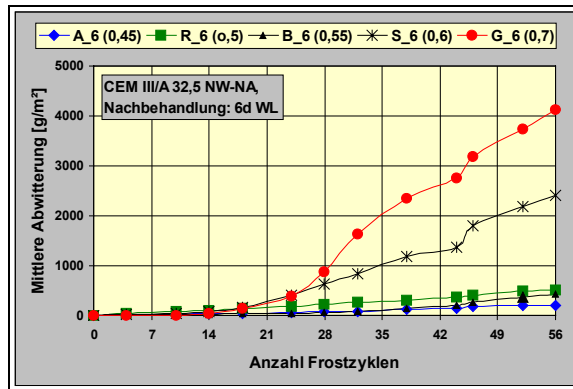


Bild 5.13: Abwitterungsverlauf während 56 FTW, Versuchsserien ohne LP-Mittel

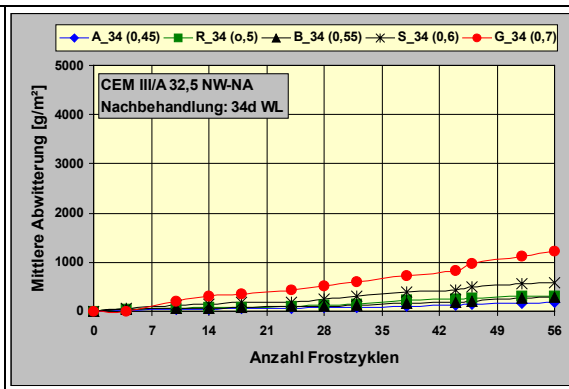


Bild 5.14: Abwitterungsverlauf während 56 FTW, Versuchsserien ohne LP-Mittel

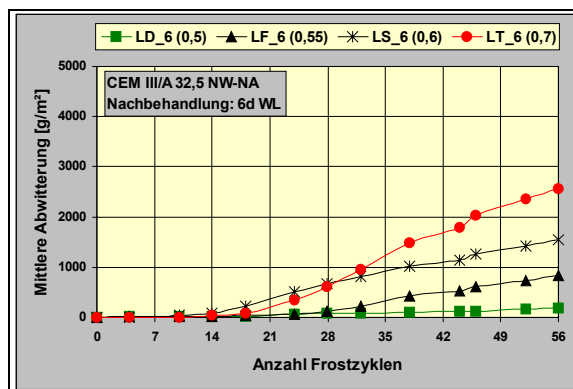


Bild 5.15: Abwitterungsverlauf während 56 FTW, Versuchsserien mit LP-Mittel

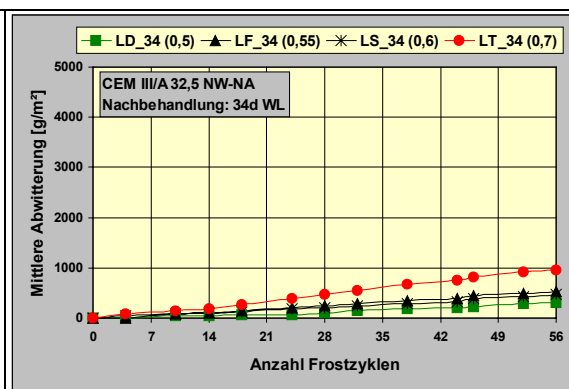


Bild 5.16: Abwitterungsverlauf während 56 FTW, Versuchsserien mit LP-Mittel

### 5.1.7 Innere Schädigung des Betongefüges

Wie bereits im vorangegangenen Kapitel bemerkt, tritt neben der äußeren Schädigung der Betonoberfläche dominant eine innere Gefügeschädigung auf. Als Kennwert der inneren Schädigung werden entsprechend Bild 5.17 mechanische Kenngrößen, jedoch als Untersuchungsschwerpunkt elastische Kennwerte durch Anwendung akustischer Prüfverfahren erfaßt. Die Tabelle 5.3 bis Tabelle 5.8 vermitteln einen Gesamtüberblick zu den erzielten Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie die in diesem Zusammenhang ermittelten Dauerhaftigkeitskennwerte der untersuchten CEM I- und CEM III-Betone.



Tabelle 5.3: Kennwerte der Versuchsserien mit CEM I 32,5 R

		Frischbetonkennwerte					Festbetonkennwerte			Dauerhaftigkeitskennwerte					
Serie	w/z-Wert	Zement- gehalt	Wasser- gehalt	Luft- gehalt	Ausbreit- maß	$\rho_f$	$\beta_{Wm\ 28}$	$\beta_{BZ\ 28}$	$\beta_{BZ}$ 56 FTW	WA 56 FTW	Abwitt. 56 FTW	$E_{dyn\ DW}$ 0 FTW	$E_{dyn\ DW}$ 56 FTW	$E_{dyn\ BW}$ 0 FTW	$E_{dyn\ BW}$ 56 FTW
		[kg/m³]	[kg/m³]	[%]	[cm]	[kg/m³]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[kg/m²]	[g/m²]	[kN/mm²]	[kN/mm²]	[kN/mm²]	[kN/mm²]
U	0,45	378	170	2,4	41	2356	55,6	6,7	5,2	3,2	77	44,3 ± 0,4	36,4 ± 0,7	43,2 ± 0,2	33,2 ± 0,4
V	0,5	340	170	2,2	43	2335	48,3	6,1	4,6	3,6	85	43,5 ± 0,2	32,1 ± 0,5	43,0 ± 0,4	28,8 ± 0,5
W	0,55	309	170	2,6	42	2329	39,6	5,9	3,5	3,9	126	43,3 ± 0,6	27,9 ± 0,9	41,6 ± 0,3	24,9 ± 0,7
PS	0,6	283	170	2,2	46	2322	40,3	5,2	2,9	4,1	423	43,5 ± 0,5	27,3 ± 1,2	41,8 ± 0,4	23,8 ± 0,8
PT	0,7	243	170	2,3	48	2316	36,1	3,9	1,1	5,4	577	41,0 ± 0,6	11,6 ± 2,1	38,6 ± 0,6	9,8 ± 1,1
LI <sup>14</sup>	0,5	340	170	6,0	47	2266	40,3	5,5	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
LX	0,55	309	170	6,2	51	2242	36,2	5,0	5,1	3,2	119	36,5 ± 0,8	36,6 ± 0,7	35,7 ± 0,3	35,9 ± 0,3
LY	0,6	283	170	6,4	54	2217	35,3	4,6	4,4	3,5	204	36,8 ± 0,3	37,3 ± 0,3	35,6 ± 0,5	35,5 ± 0,6
LZ	0,7	243	170	6,2	56	2191	28,5	4,3	3,9	4,5	253	35,0 ± 0,4	34,9 ± 0,6	33,6 ± 0,4	33,2 ± 0,5

<sup>14</sup> Versuchsserien mit LP-Mittel (L), nur Bestimmung  $\beta_D$  vorgesehen

Tabelle 5.4: Änderung des dynamischen E-Moduls, Variationskoeffizienten der CEM I- Betone

CEM I		Dehnwellenresonanzverfahren				Eigenschwingzeitmessung				CIF-Test			
Serie	w/z-Wert	Änderung E <sub>dyn 28 FTW</sub>	Var.-koeff. V <sub>r 28 FTW</sub>	Änderung E <sub>dyn 56 FTW</sub>	Var.-koeff. V <sub>r 56 FTW</sub>	Änderung E <sub>dyn 28 FTW</sub>	Var.-koeff. V <sub>r 28 FTW</sub>	Änderung E <sub>dyn 56 FTW</sub>	Var.-koeff. V <sub>r 56 FTW</sub>	Änderung E <sub>dyn 28 FTW</sub>	Var.-koeff. V <sub>r 28 FTW</sub> <sup>15</sup>	Änderung E <sub>dyn 56 FTW</sub>	Var.-koeff. V <sub>r 56 FTW</sub>
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
U	0,45	-6,5	0,7	-17,9	1,9	-8,1	1,0	-22,0	1,3	-1,6	0,4	-8,5	1,0
V	0,50	-9,2	0,8	-26,3	1,4	-11,6	0,7	-33,1	1,7	-3,5	0,4	-17,3	0,6
W	0,55	-12,2	2,8	-35,6	3,4	-13,8	0,7	-40,1	2,9	-4,4	0,9	-26,7	3,1
PS	0,6	-13,9	2,0	-37,3	4,1	-15,4	0,9	-43,1	3,4	-6,6	1,0	-28,8	1,7
PT	0,7	-35,3	13,2	-71,7	18,1	-37,4	4,6	-74,6	11,2	-22,9	6,0	-62,3	10,4
LX	0,55	0,3	1,9	0,4	1,8	0,2	1,9	0,6	1,3	-3,2	0,5	0,1	0,5
LY	0,6	0,5	1,0	1,3	0,7	-0,6	1,4	-0,3	1,7	-2,6	1,1	-0,1	0,9
LZ	0,7	0,7	1,1	-0,2	1,7	-0,7	2,2	-1,1	2,7	-2,0	0,6	-0,1	0,7

<sup>15</sup> rel. Variationkoeffizient der Impulslaufzeit

Tabelle 5.5: Kennwerte der Versuchsserien mit CEM III/A 32,5 NW-NA (ohne LP-Mittel)

		Frischbetonkennwerte					Festbetonkennwerte			Dauerhaftigkeitskennwerte					
Serie	w/z-Wert	Zement-gehalt	Wasser-gehalt	Luft-gehalt	Ausbreit-maß	$\rho_f$	$\beta_{wm}$	$\beta_{BZ}$	$\beta_{BZ}$ 56 FTW	WA 56 FTW	Abwitt. 56 FTW	$E_{dyn DW}$ 0 FTW	$E_{dyn DW}$ 56 FTW	$E_{dyn BW}$ 0 FTW	$E_{dyn BW}$ 56 FTW
		[kg/m³]	[kg/m³]	[%]	[cm]	[kg/m³]	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[kg/m²]	[g/m²]	[kN/mm²]	[kN/mm²]	[kN/mm²]	[kN/mm²]
A_6	0,45	411	185	2,3	38	2341	56,7	6,8	2,8	3,6	202	43,6 ± 0,4	18,8 ± 2,9	42,1 ± 0,7	17,2 ± 1,6
A_34	0,45	411	185	2,3	38	2341	60,2	8,0	3,1	2,8	195	45,0 ± 0,9	30,0 ± 2,5	44,2 ± 1,6	26,5 ± 3,3
R_6	0,5	370	185	1,9	42	2337	45,1	6,8	1,9	4,1	513	43,6 ± 0,5	20,5 ± 2,3	42,1 ± 0,4	18,2 ± 2,2
R_34	0,5	370	185	1,9	42	2337	58,4	7,3	2,7	2,8	318	45,1 ± 0,5	30,4 ± 0,6	43,3 ± 0,4	26,5 ± 1,1
B_6	0,55	318	175	2,0	41	2348	40,0	6,2	1,1	4,9	433	42,0 ± 0,4	6,8 ± 1,1	40,4 ± 0,4	6,1 ± 0,4
B_34	0,55	318	175	2,0	41	2348	47,6	6,8	1,5	3,4	296	43,9 ± 0,4	14,5 ± 1,4	42,7 ± 0,6	10,8 ± 1,3
S_6	0,6	292	175	1,7	43	2340	36,6	4,5	0,92	6,0	2402	41,7 ± 0,6	12,1 ± 0,7	40,2 ± 0,8	9,4 ± 1,1
S_34	0,6	292	175	1,7	43	2340	44,3	6,0	0,97	3,9	584	42,0 ± 0,5	14,6 ± 0,6	39,7 ± 0,4	12,3 ± 0,7
G_6	0,7	243	170	1,8	41	2331	31,4	4,1	0,46	7,1	4121	40,0 ± 0,3	6,1 ± 0,6	36,4 ± 0,4	2,20 ± 0,4
G_34	0,7	243	170	1,8	41	2331	36,9	5,0	0,60	4,6	1225	40,8 ± 0,9	12,5 ± 1,7	38,3 ± 1,0	9,7 ± 2,0

Tabelle 5.6: Änderung des dynamischen E-Moduls, Variationskoeffizienten der CEM III/A- Betone ohne LP-Mittel

CEM III/A		Dehnenwellenresonanzverfahren				Eigenschwingzeitmessung				CIF-Test			
Serie	w/z-Wert	Änderung E <sub>dyn 28 FTW</sub>	Var.-koeff. V <sub>r 28 FTW</sub>	Änderung E <sub>dyn 56 FTW</sub>	Var.-koeff. V <sub>r 56 FTW</sub>	Änderung E <sub>dyn 28 FTW</sub>	Var.-koeff. V <sub>r 28 FTW</sub>	Änderung E <sub>dyn 56 FTW</sub>	Var.-koeff. V <sub>r 56 FTW</sub>	Änderung E <sub>dyn 28 FTW</sub>	Var.-koeff. V <sub>r 28 FTW</sub> <sup>16</sup>	Änderung E <sub>dyn 56 FTW</sub>	Var.-koeff. V <sub>r 56 FTW</sub>
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
A_6	0,45	-21,9	4,6	-56,9	17,8	-27,5	6,7	-59,3	9,5	-10,7	2,2	-27,2	4,8
A_34	0,45	-9,4	3,7	-33,3	8,4	-11,2	6,9	-40,2	12,6	-3,3	0,7	-15,1	0,6
R_6	0,5	-27,4	7,7	-52,9	11,1	-33,0	9,0	-56,7	11,8	-19,0	5,7	-46,0	19,3
R_34	0,5	-6,9	1,8	-32,6	2,0	-7,9	1,8	-39,0	4,2	-3,8	0,3	-18,7	2,5
B_6	0,55	-62,1	1,5	-83,6	16,1	-64,9	3,3	-84,9	7,1	-37,1	7,8	-63,2	13,2
B_34	0,55	-44,7	3,5	-67,1	10,6	-51,8	6,8	-74,7	12,3	-22,1	0,9	-44,3	0,9
S_6	0,6	-46,5	2,0	-71,1	5,8	-53,1	6,0	-76,8	11,7	-30,5	2,9	-55,1	3,8
S_34	0,6	-26,5	1,8	-65,4	2,0	-35,1	3,3	-68,9	5,5	-15,1	0,9	-38,2	9,1
G_6	0,7	-74,6	11,8	-84,8	8,1	-85,3	14,7	-96,0	27,4	-68,6	17,0	-90,7	30,1
G_34	0,7	-48,1	3,4	-69,5	12,8	-40,6	10,1	-74,7	20,7	-13,8	1,7	-52,3	0,6

<sup>16</sup> rel. Variationkoeffizient der Impulslaufzeit

Tabelle 5.7: Kennwerte der Versuchsserien mit CEM III/A 32,5 NW-NA (mit LP-Mittel)

		Frischbetonkennwerte					Festbetonkennwerte			Dauerhaftigkeitskennwerte					
Serie	w/z-Wert	Zement- gehalt	Wasser- gehalt	Luft- gehalt	Ausbreit- maß	$\rho_f$	$\beta_{Wm\ 28}$	$\beta_{BZ\ 28}$	$\beta_{BZ}$ 56 FTW	WA 56 FTW	Abwitt. 56 FTW	$E_{dyn\ DW}$ 0 FTW	$E_{dyn\ DW}$ 56 FTW	$E_{dyn\ BW}$ 0 FTW	$E_{dyn\ BW}$ 56 FTW
		[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[cm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]	[kN/mm <sup>2</sup> ]
LD_6 <sup>17</sup>	0,5	370	185	5,9	53	2235	39,5	5,6	5,3	3,2	178	38,4 ± 0,1	38,4 ± 0,2	37,1 ± 0,5	36,9 ± 0,2
LD_34	0,5	370	185	5,9	53	2235	49,3	n. b.	5,5	2,8	304	38,5 ± 0,8	38,1 ± 0,8	37,3 ± 0,9	37,4 ± 1,0
LF_6	0,55	318	175	5,9	53	2236	36,4	5,5	4,8	4,7	836	34,6 ± 0,3	34,7 ± 0,3	33,3 ± 0,4	32,7 ± 0,6
LF_34	0,55	318	175	5,9	53	2236	42,1	n. b.	5,5	3,3	521	37,2 ± 0,3	36,9 ± 0,4	36,1 ± 0,5	36,0 ± 0,5
LS_6	0,6	292	175	5,9	52	2234	29,2	4,9	5,3	4,1	1543	36,3 ± 0,9	35,2 ± 0,7	33,5 ± 0,4	32,5 ± 0,4
LS_34	0,6	292	175	5,9	52	2234	40,8	n. b.	4,0	3,5	459	38,2 ± 0,7	38,0 ± 0,7	n. b.	n. b.
LT_6	0,7	243	170	5,8	52	2227	20,4	3,9	4,5	5,2	2566	32,5 ± 1,4	31,6 ± 0,7	29,6 ± 1,4	28,4 ± 1,5
LT_34	0,7	243	170	5,8	52	2227	29,9	n. b.	3,5	3,1	958	36,1 ± 0,9	34,7 ± 0,7	n. b.	n. b.

<sup>17</sup> Angabe der Nachbehandlungsdauer

Tabelle 5.8: Änderung des dynamischen E-Moduls, Variationskoeffizienten der CEM III/A- Betone mit LP-Mittel

CEM III/A		Dehnwellenresonanzverfahren				Eigenschwingzeitmessung				CIF-Test			
Serie	w/z-Wert	Änderung E <sub>dyn 28 FTW</sub>	Var.-koeff. V <sub>r 28 FTW</sub>	Änderung E <sub>dyn 56 FTW</sub>	Var.-koeff. V <sub>r 56 FTW</sub>	Änderung E <sub>dyn 28 FTW</sub>	Var.-koeff. V <sub>r 28 FTW</sub>	Änderung E <sub>dyn 56 FTW</sub>	Var.-koeff. V <sub>r 56 FTW</sub>	Änderung E <sub>dyn 28 FTW</sub>	Var.-koeff. V <sub>r 28 FTW</sub> <sup>18</sup>	Änderung E <sub>dyn 56 FTW</sub>	Var.-koeff. V <sub>r 56 FTW</sub>
		[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
LD_6	0,5	-1,1	0,6	0,1	0,5	-1,1	0,6	-0,6	0,6	0,7	0,6	-2,7	1,0
LD_34	0,5	-1,0	2,1	-1,0	2,1	-1,5	2,4	0,3	2,7	-2,4	0,7	-0,8	0,6
LF_6	0,55	-1,3	1,3	0,2	1,0	-1,7	1,8	-1,7	1,8	0,5	0,2	0,8	0,5
LF_34	0,55	-3,1	0,9	-0,8	0,9	-3,2	0,6	-0,5	1,4	-2,6	0,6	-0,2	0,1
LS_6	0,6	-2,5	1,5	-3,1	1,9	-1,9	0,8	-3,0	1,1	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.
LS_34	0,6	-2,3	1,4	-0,4	1,9	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	-9,1	1,0	-5,3	0,81
LT_6	0,7	-0,6	3,2	-2,7	2,2	-2,7	5,6	-4,3	5,7	-0,2	1,0	1,1	0,5
LT_34	0,7	-4,2	2,1	-4,0	2,2	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	-9,7	0,8	-11,6	2,0

<sup>18</sup> rel. Variationskoeffizient der Impulslaufzeit

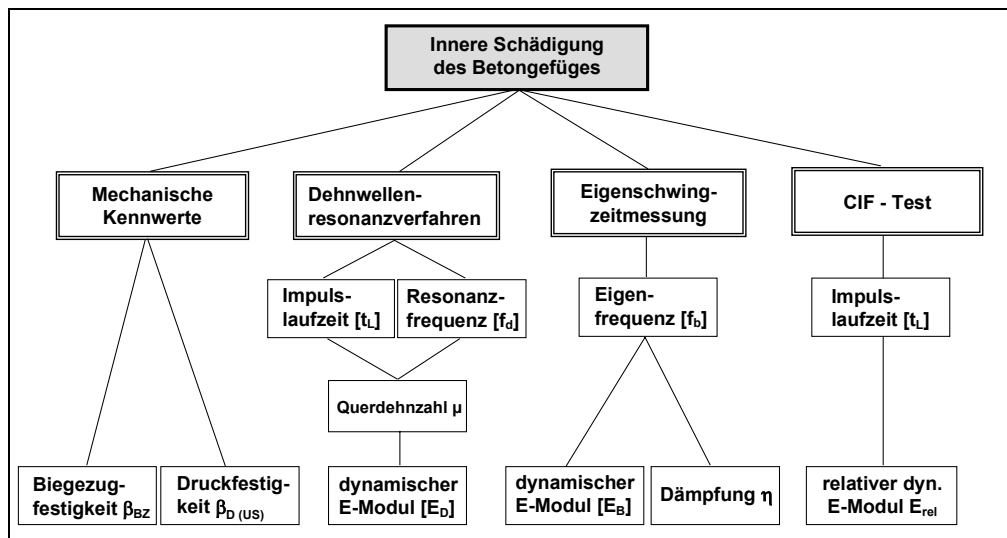


Bild 5.17: Übersicht der verwendeten Meßverfahren zur Bestimmung der inneren Schädigung

Die Ermittlung von mechanischen Kennwerten zur Charakterisierung des Schädigungsverlaufes während 56 FTW kann nur mit Kompromissen vorgenommen werden. Prüfbare Probekörpergeometrien für die Biegezugprüfung können nur im Zusammenhang mit den Prüfparametern des CF-Verfahrens (siehe Kapitel 5.1.6) festgelegt werden. So ist zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit von Prüfergebnissen eine Probekörperhöhe von ca. 75 mm entsprechend des halbierten Würfels der Kantenlänge von 150 mm einzuhalten, um z.B. die Bedingungen der Wasseraufnahme und der zu erzeugenden Minimaltemperaturen nicht zu verändern.

#### ◆ Biegezugfestigkeit

Die Prüfung der Biegezugfestigkeit erfolgte in Anlehnung zur DIN 1048/5 [6] an Betonprismen der genannten Abmessungen 75 x 75 x 250 mm<sup>3</sup> bzw. 80 x 80 x 250 mm<sup>3</sup>. Sie ist wie die zentrische Zugfestigkeit vom w/z-Wert, vom Hydratationsgrad und von der Haftung zwischen Zementstein und Zuschlag abhängig [79]. Aufgrund der Probekörperabmessungen wurde der Lasteintrag in der Mitte der Stützweite von 220 mm als Einzellast vorgenommen. Zur Prüfung wurde der Probekörper so aufgelegt, daß die Zugbelastung in der Betonrandzone der Befrostung auftritt. Durch die Belastung mit einer Einzellast in der Balkenmitte treten ca. 10 % höhere Werte auf, als mit Einzellasten in den Drittelpunkten [1]. Eine weitere Beeinflussung entsteht durch das Verhältnis Stützweite l zur Querschnittshöhe h (Biegeschlankheit). Da  $l/h < 5$  ist, muß mit höheren Biegezugfestigkeiten gerechnet werden [47]. Dennoch liegen die aktuell ermittelten Werte der Vergleichsproben aller Versuchsserien im typischen Bereich von 3 bis 8 N/mm<sup>2</sup> für Normalbeton, [47, 79]. Bild 5.18 verdeutlicht die Ausgangswerte der CEM I- Betone mit und ohne LP-Mittel in Abhängigkeit vom w/z-Wert sowie dem eingetretenen Festigkeitsabfall verursacht durch die Frostbelastung. Die eingetretene Gefügeschädigung zeichnet sich bei den Betonen ohne LP-Mittel durch einen Festigkeitsverlust nach 56 FTW von ca. 1,5 N/mm<sup>2</sup> beim w/z-Wert = 0,45, ansteigend auf ca. 2,8 N/mm<sup>2</sup> beim w/z-Wert = 0,7 ab. Die Signifikanz dieser Differenzbeträge muß

jedoch auf der Basis einer höheren Probekörperanzahl pro Versuchsserie nachgewiesen werden. Die Wirkung der LP-Mittel zeichnet sich durch niedrigere Vergleichswerte ab, die mit den Werten nach 56 FTW aufgrund nicht nachweisbarer Gefügeveränderungen übereinstimmen. Aufgrund mangelnder Probekörperanzahl wurden statistische Kennwerte entsprechend Tabelle 5.9 berechnet.

Tabelle 5.9: Variationskoeffizienten der Biegezugprüfung

	$V_{r\text{ CEM I}} [\%]$		$V_{r\text{ CEM III/A}} [\%]$	
	ungeschädigt	geschädigt	ungeschädigt	geschädigt
ohne LP	3,8	10,0	7,2	12,5
mit LP	3,0	6,9	5,0	4,9

Die Variationskoeffizienten verdeutlichen die klare Abgrenzung zwischen geschädigten und ungeschädigten Probekörpern sowie den Einfluß der LP-Mittel. Dieser Sachverhalt unterscheidet sich zu den Versuchsserien mit CEM III/A-Zement nur durch eine höhere Differenz zwischen geschädigten und ungeschädigten Probekörpern, die bei allen Versuchsserien ohne LP-Mittel ca. 3,5 bis 5 N/mm<sup>2</sup> beträgt, Bild 5.19.

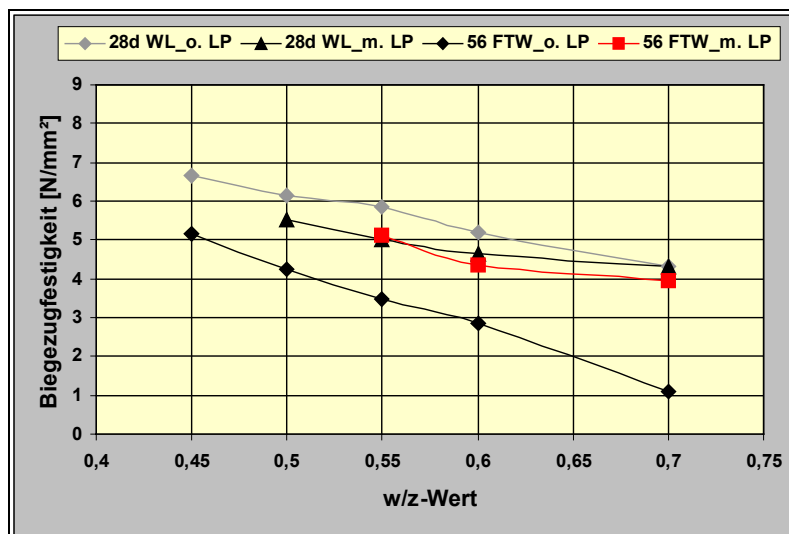


Bild 5.18: Biegezugfestigkeit der Versuchsserien mit CEM I 32,5 R



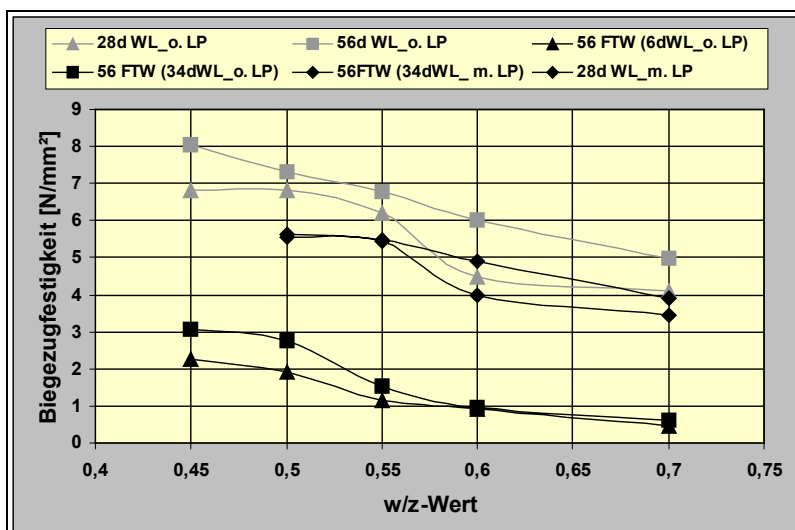


Bild 5.19: Biegezugfestigkeiten der Versuchsserien mit CEM III/A 32,5 NW-NA

#### ◆ Druckfestigkeit

Die Erfassung von Änderungen der wahren Druckfestigkeit  $\beta_w$  ist nicht nur wegen der zur Verfügung stehenden Probekörpergeometrie problematisch, sondern auch, weil das Prüfverfahren selbst nicht sensibel genug auf Gefügeveränderungen, wie Mikrorisse reagiert. Vorhandene Mikrorisse werden zusammengedrückt, die gedrungene Form des Probekörpers führt aufgrund der Behinderung der Querdehnung zu höheren Druckfestigkeiten. Da eine aussagefähige Druckfestigkeitsprüfung während und nach erfolgter Prüfung des Frostwiderstandes nahezu unmöglich ist, wurde der Versuch unternommen, das im Kapitel 2.1.3 beschriebene CONSONIC-Meßsystem für diesen Anwendungsfall zu testen, da die vergleichbaren Ausgangsfestigkeiten  $\beta_{wm}$  und die Rezepturen bekannt waren. An dieser Stelle soll die Bewertung der Untersuchungsergebnisse jedoch nur qualitativ vorgenommen werden, da unterschiedliche Feuchtegehalte der Probekörper während der Frostprüfung die berechneten Druckfestigkeiten zu stark beeinflussen. In Tabelle 5.10 und Tabelle 5.11 wurden die Druckfestigkeit  $\beta_{wm}$  den  $\beta_{D(US, P) 0 FTW}$  gegenübergestellt und die Änderung aus  $\beta_{D(US, P) 0 FTW}$  zu  $\beta_{D(US, P) 56 FTW}$  berechnet.

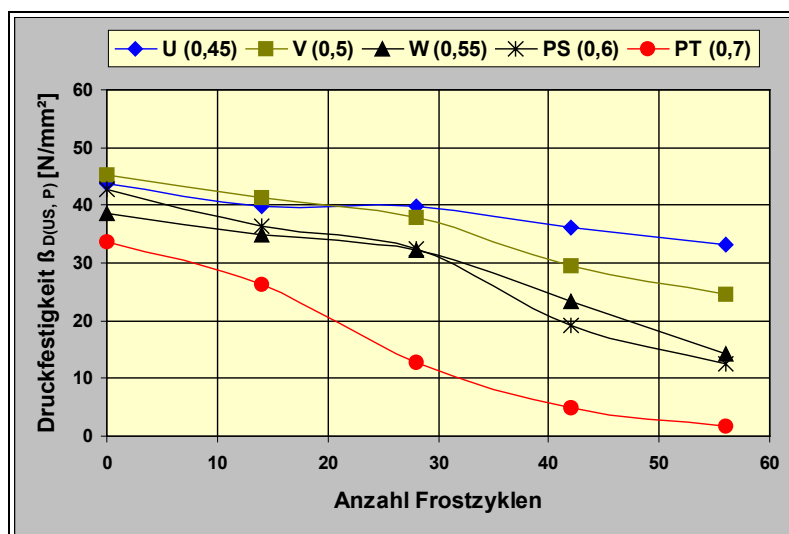
Tabelle 5.10: Änderung von  $\beta_{D(US)}$  während 56 FTW der Versuchsserien mit CEM I 32,5 R

Serie CEM I	$\beta_{wm 28}$	$\beta_{D(US, P) 0 FTW}$	$\beta_{D(US, P) 56 FTW}$	Änderung $\beta_{D(US, P)}$
	[N/mm²]	[N/mm²]	[N/mm²]	[%]
U	55,6	45,0	33,2	24,3
V	48,3	48,8	24,6	45,6
W	39,6	40,4	14,2	63,3
PS	40,3	39,6	12,6	70,4
PT	36,1	28,7	1,7	95,1

Tabelle 5.11: Änderung von  $\beta_{D(US)}$  während 56 FTW der Versuchsserien mit CEM III/A 32,5 NW-NA

Serie CEM III/A	$\beta_{Wm 28}$ 6d WL	$\beta_{D(US, P)}$ 6d WL, 0 FTW	$\beta_{D(US, P)}$ 6d WL, 56 FTW	$\beta_{Wm 28}$ 34d WL	$\beta_{D(US, P)}$ 34d WL, 0 FTW	$\beta_{D(US, P)}$ 34d WL, 56 FTW	Änderung $\beta_{D(US, P)}$ 6d WL	Änderung $\beta_{D(US, P)}$ 34d WL
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[%]
A	56,7	47,0	17,2	60,2	52,6	30,6	64,3	41,9
R	45,1	46,5	13,6	58,4	49,5	28,8	70,4	41,9
B	40,0	35,6	2,1	47,6	44,4	6,1	94,6	86,3
S	36,6	34,0	3,1	44,3	39,4	5,3	91,6	86,6
G	31,4	26,7	0,2	36,9	36,4	3,1	99,2	91,4

Die Druckfestigkeitswerte  $\beta_{D(US, P)}$  wurden als Mittelwert aus 5 Einzelwerten der verwendeten Betonprismen berechnet. Im Bild 5.20 sind die Kurvenverläufe der Druckfestigkeit für die Versuchsserien mit CEM I und im Bild 5.21 sowie Bild 5.22 der Versuchsserien mit CEM III/A mit der angewendeten Nachbehandlungsdauer jeweils ohne LP-Mittel dargestellt. Die Kurvenverläufe stellen die Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom w/z-Wert im richtigen Verhältnis zueinander dar. Die Änderung der Impulslaufzeit als Kenngröße der inneren Schädigung wird in analoger Weise abgebildet (siehe Kapitel 5.1.7). In Abhängigkeit von der Betonrezeptur ist der Abfall von  $\beta_{D(US)}$  höher als der Abfall des dynamischen E-Moduls  $E_D$ . Die geringeren Änderungen der Druckfestigkeit bei den CEM I-Betone gegenüber den CEM III-Betonen, der Einfluß des w/z-Wertes sowie die Wirkung der Nachbehandlungsdauer werden entsprechend der eingetretenen inneren Schädigung differenziert (Tabelle 5.10, Tabelle 5.11).

Bild 5.20: Berechnete Druckfestigkeiten  $\beta_{D(US, P)}$  der Versuchsserien CEM I ohne LP-Mittel

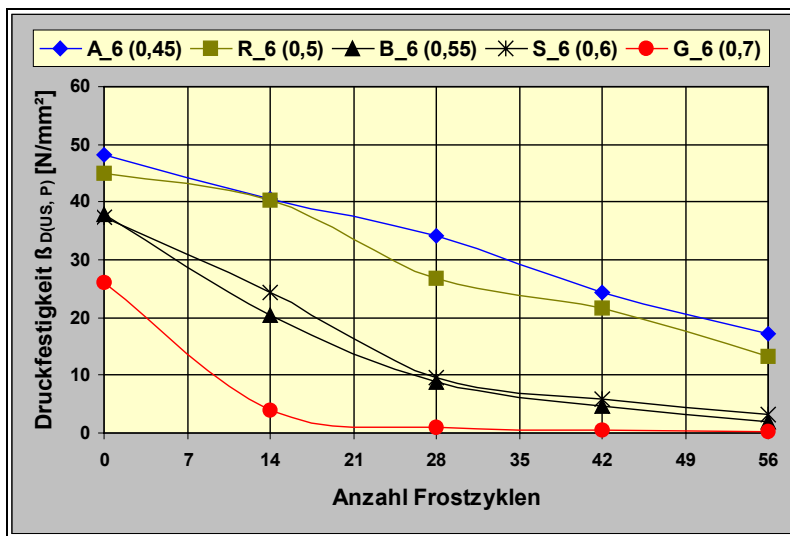


Bild 5.21: Berechnete Druckfestigkeiten  $\beta_{D(US, P)}$  der Versuchsserien CEM III/A, 6d WL, ohne LP-Mittel

Aus den berechneten  $\beta_{D(US, P)}$  –Werten nach 56 FTW können Rückschlüsse auf den Schädigungsgrad des Zementsteins gezogen werden.

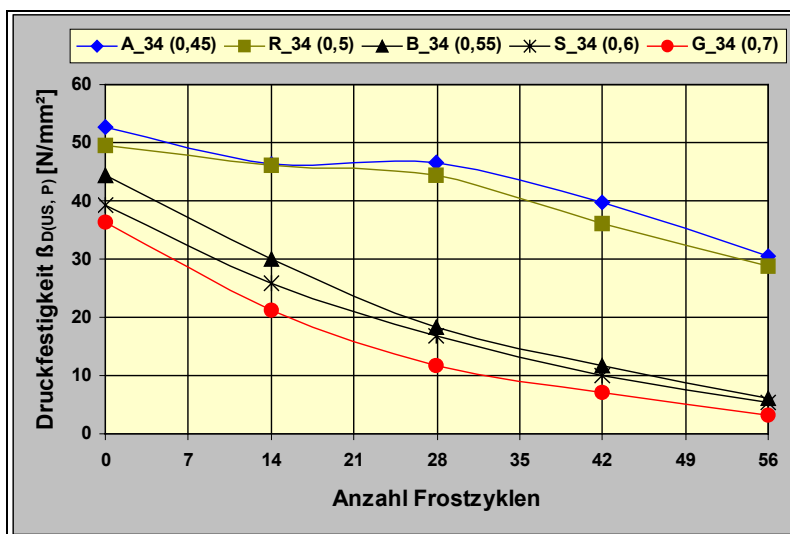


Bild 5.22: Berechnete Druckfestigkeiten  $\beta_{D(US, P)}$  der Versuchsserien CEM III/A, 34d WL, ohne LP-Mittel

Zu diskutieren wäre noch der bereits erwähnte Einfluß der Wasseraufnahme während des kapillaren Saugens (Vorsättigung) und der 56 FTW. Die Wasseraufnahme während des kapillaren Saugens würde je nach Saugvermögen des untersuchten Betons zu einer geringfügigen Erhöhung der berechneten  $\beta_{D(US, P)}$  –Werte führen, da zusätzlich zur fortschreitenden Hydratation eine Verbesserung der Schalleitung durch die wasser-gefüllten Poren eintritt. Dieser Sachverhalt trifft vor allem für die Betone mit hohen w/z-Werten zu. Die Wasseraufnahme während der 56 FTW würde mit zunehmender Gefügeschädigung nur noch einen abnehmenden Fehleranteil darstellen. In der Praxis werden Druckfestigkeitsprüfungen nach DIN 1048, Teil 5 [6] an trockengelagerten

Probekörpern durchgeführt. Die in diesem Zusammenhang gewonnenen Druckfestigkeiten liegen höher, als die von Probekörpern, die zuvor einer Wasserlagerung entnommen wurden. Infolge Austrocknung wird die innere Reibung innerhalb des Zementsteingerüsts im Belastungsfall vergrößert, so daß höhere Druckfestigkeiten ermittelt werden [168]. Eine hohe Eigenfeuchte führt bei Betonen mit gleicher Zusammensetzung, Verdichtung sowie vergleichbarem Hydratationsgrad zur Minderung der Druckfestigkeit [79].

#### ◆ Dynamischer Elastizitätsmodul

Im Kapitel 2.2.2 wurde bereits erläutert, daß zur Berechnung von  $E_{\text{dyn}}$  nach dem Dehnwellenresonanzverfahren zwei Meßgrößen in einem Ankoppelvorgang erfaßt werden müssen, die Impulslaufzeit  $t_l$  und die Dehnwellenresonanz  $f_d$ . Die Ankopplung der Schallwandler erfolgt mittig an den gegenüberliegenden Stirnseiten des Betonprismas. Die Ankoppelbedingungen sind Kapitel 4.2.1, die Verzögerungszeit Kapitel 4.3 sowie die Digitalisierungsbedingungen Kapitel 4.4, Tabelle 4.4 zu entnehmen.

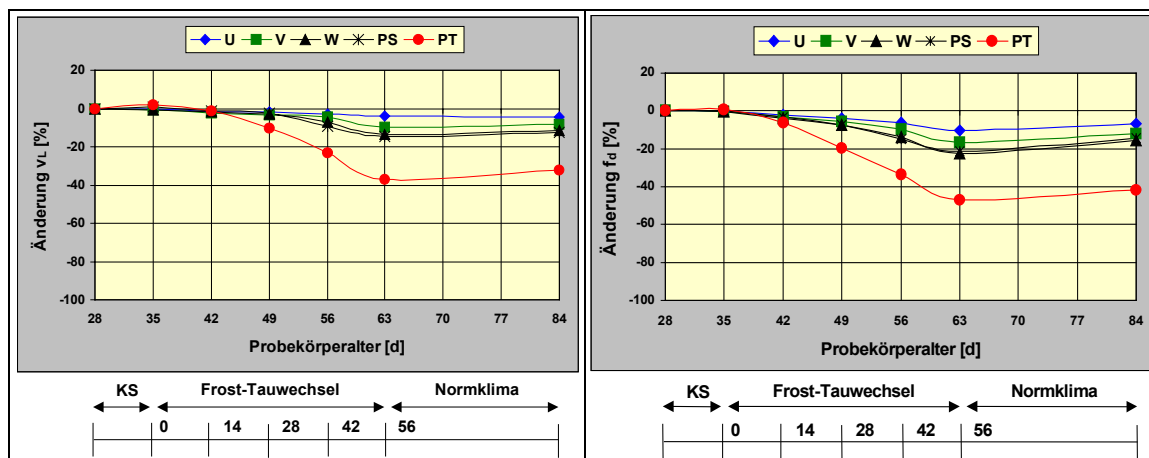


Bild 5.23: Änderung von  $v_L$  (links) und  $f_d$  (rechts) der CEM I- Betone während des CF-Testes mit anschließender Trockenlagerung im Normklima

Bild 5.23 und Bild 5.24 verdeutlichen die Änderungen von  $v_L$  und  $f_d$  während der Prüfung des Frostwiderstandes mit anschließender Lagerung im Normklima bei  $T = 20^\circ\text{C}$  und  $r. F. = 65\%$ . Das kapillare Saugen führt je nach aufgenommener Wassermenge zu einem geringfügigen Anstieg von  $v_L$  und  $f_d$ . Beide Meßgrößen fallen mit zunehmender Anzahl FTW in Abhängigkeit vom  $w/z$ -Wert nach 56 FTW auf einen charakteristischen Minimalwert, der die eingetretene Gefügeschädigung zum Ausdruck bringt. Die anschließende 21-tägige Trockenlagerung im Normklima führt bei  $v_L$  zu einem geringen und bei  $f_d$  zu einem höheren Anstieg der Meßwerte. Erholungseffekte im Betongefüge durch weiter fortschreitende Hydratation wird im wesentlichen den Anstieg von  $v_L$  und  $f_d$  nach erfolgter Trockenlagerung verursachen, der bei den Frequenzwerten noch von einer abnehmenden Dämpfung infolge der Austrocknung verstärkt wird. Denkbar wäre auch, daß durch die Mikrorißbildung reaktive Zement-

partikel entstehen, die im Hydratationsprozeß wirksam werden können und somit diesen Anstieg mit bewirken.

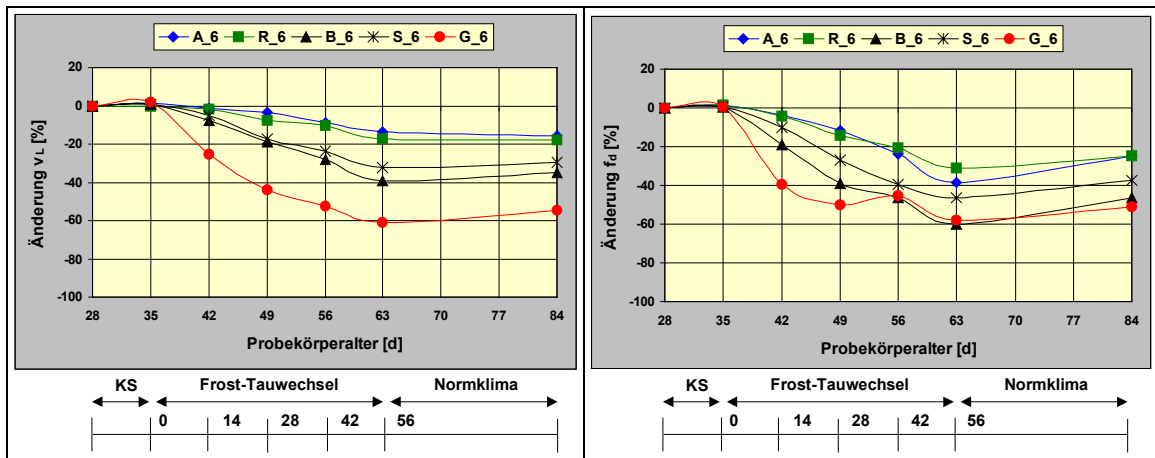


Bild 5.24: Änderung von  $v_L$  (links) und  $f_d$  (rechts) der CEM III/A- Betone mit 6d Nachbehandlung während des CF-Testes mit anschließender Trockenlagerung im Normklima

Die Auswirkungen von Gefügeschädigungen auf die Lage der Amplitudenmaxima (Resonanzfrequenz), auf die Amplitudenform (Dämpfung) und auf die Amplitudenverteilung ist dem Vergleich zwischen Bild 5.25 und Bild 5.26 zu entnehmen, dargestellt an CEM III/A-Betonen, w/z-Wert = 0,7 mit und ohne LP-Mittel. Der Einfluß der LP-Mittel zeichnet sich deutlich ab. Die Versuchsserie LT\_6 zeigt einen Frequenzabfall von 1,2 % während der 56 FTW, die Amplitudenverteilung ist bis zum Abschluß der Frostprüfung nahezu identisch. Die 2. Oberwelle, die nur vor der Wasseraufnahme (vor KS) angeregt werden kann, wird nach dem kapillaren Saugen vollständig gedämpft.

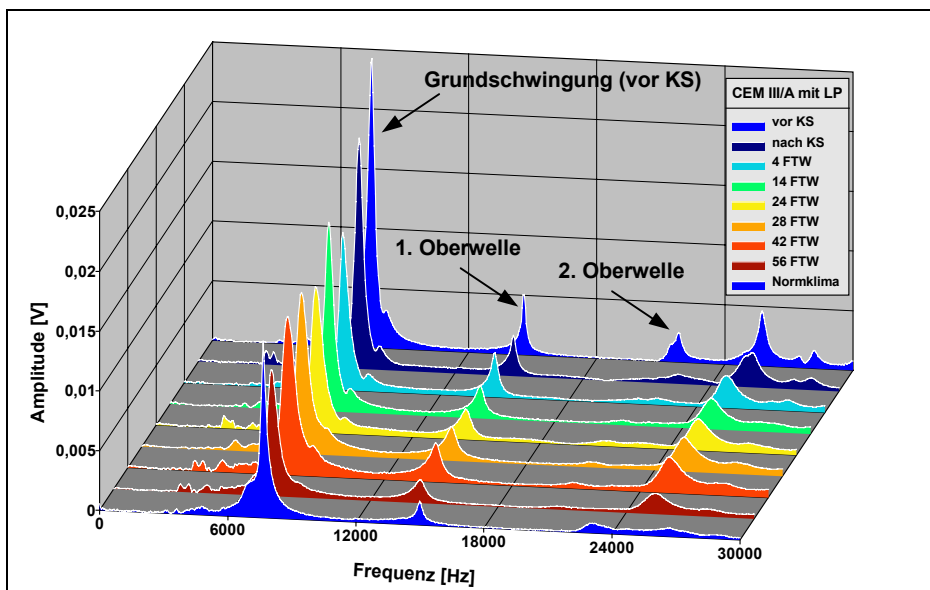


Bild 5.25: Amplitudenverteilung der Dehnwellenresonanz während der Prüfung des Frostwiderstandes, Versuchsserie LT\_6 (w/z= 0,7; Nachbehandlung 6 Tage)

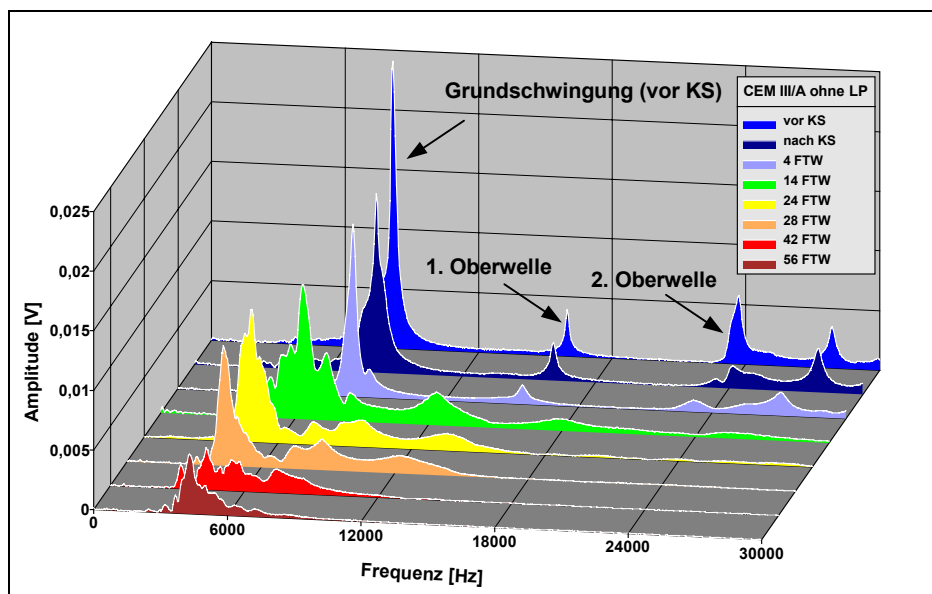


Bild 5.26: Amplitudenverteilung der Dehnwellenresonanz während der Prüfung des Frostwiderstandes, Versuchsserie G\_6 ( $w/z = 0,7$ ; 6 Tage Nachbehandlung)

Die Probekörper der Versuchsserie G\_6 zeigen einen Frequenzabfall der Dehnwelle von 59,6 % während der 56 FTW, der zu 80 % während der ersten 28 FTW eintritt. Die Änderung der Amplitudenform der Grundschwingung zeichnet sich ab 14 FTW deutlich ab. Die hohe Geschwindigkeit der Wasseraufnahme (siehe Bild 5.6) führt zu einem schnellen Schädigungsfortschritt. In der Amplitudenverteilung ist die vollständige Dämpfung der 1. Oberwelle zu erkennen. Die 2. Oberwelle, die aufgrund des dichteren Ausgangsgefüges (Beton ohne LP-Mittel) eine größere Amplitude aufweist, wird nach dem kapillaren Saugen ebenfalls vollständig gedämpft. Eine weitere drastische Änderung der Amplitudenform der Grundschwingung tritt nach 28 FTW ein, wodurch die eingetretene hohe Gefügeschädigung angezeigt wird.

Die Biegewellenresonanz zeigt am Beispiel der CEM III/A- Betone mit und ohne LP-Mittel generell gut auswertbare Schwingungsamplituden (Bild 5.27, Bild 5.28). Die Gefügeschädigungen zeichnen sich durch den eingetretenen Frequenzabfall eindeutig ab (Bild 5.28). Die nach dem kapillaren Saugen eintretende Signaldämpfung ist gut sichtbar. Der LP-Beton (Serie LT\_6, Bild 5.27) zeigt nach dem kapillaren Saugen nur eine geringe, jedoch stetig zunehmende Dämpfung. Die bei den Probekörpern der Versuchsserie G\_6 (ohne LP) bis 14 FTW einsetzende hohe Gefügeschädigung führt zu einem weiteren Anstieg der Dämpfung, die dann im weiteren Schädigungsverlauf nur noch geringen Änderungen unterliegt (Bild 5.28). Die gewählten Digitalisierungsbedingungen sowie die Ausgabeparameter des GrindoSonic-Gerätes lassen nur die Auswertung der Grundschwingung zu.

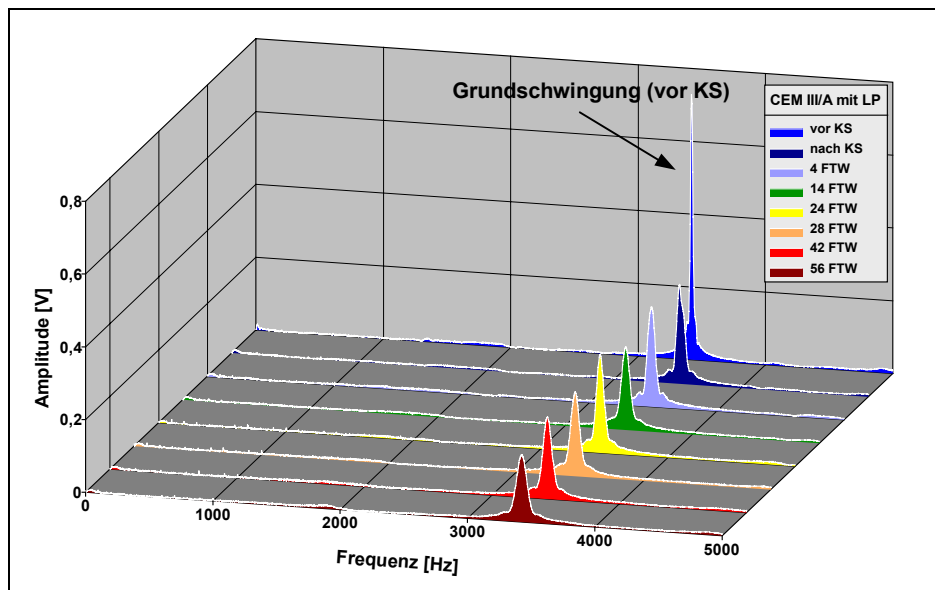


Bild 5.27: Amplitudenverteilung der Biegewellenresonanz (Grundschiwingung) während der Prüfung des Frostwiderstandes, Versuchsserie LT\_6 ( $w/z = 0,7$ ; Nachbehandlung 6 Tage)

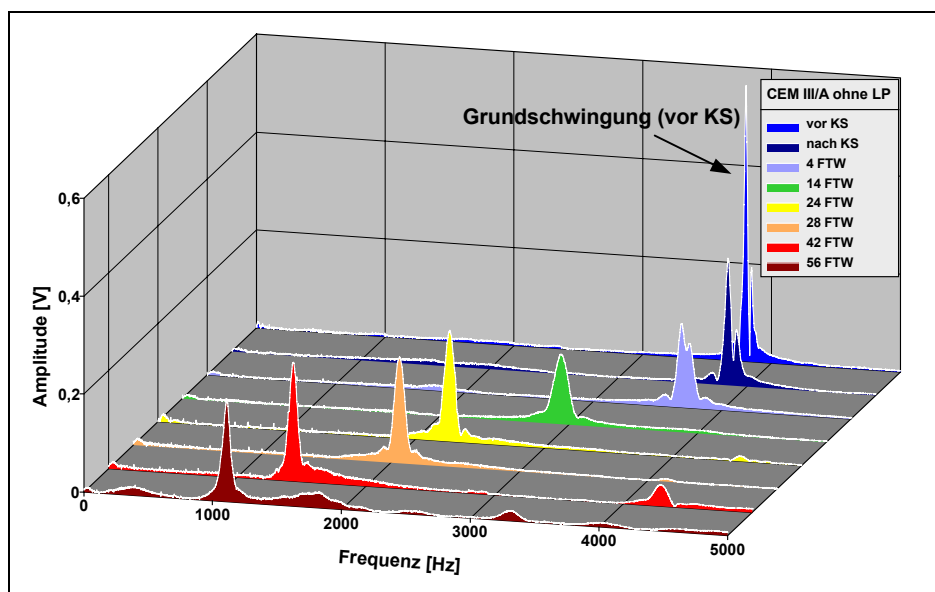


Bild 5.28: Amplitudenverteilung der Biegewellenresonanz (Grundschiwingung) während der Prüfung des Frostwiderstandes, Versuchsserie G\_6 ( $w/z = 0,7$ ; Nachbehandlung 6 Tage)

Der berechnete Q-Faktor verdeutlicht die Differenzierung zwischen den Versuchsserien LT\_6 und G\_6 auf der Basis des berechneten Q-Faktors (Bild 5.45).

Die Änderung des dynamischen E-Modules  $E_D$  der CEM I-Betone mit und ohne LP-Mittel ist in Bild 5.29 dargestellt. Die LP-Betone zeigen keine meßbaren Gefügeschädigungen. Die untersuchten LP-freien Betone zeigen in Abhängigkeit vom  $w/z$ -Wert zwar Gefügeschädigungen, die aber erst bei  $w/z$ -Werten  $> 0,6$  zu einem stark erhöhten E-Modulabfall (Serie PT) führen, Bild 5.30.

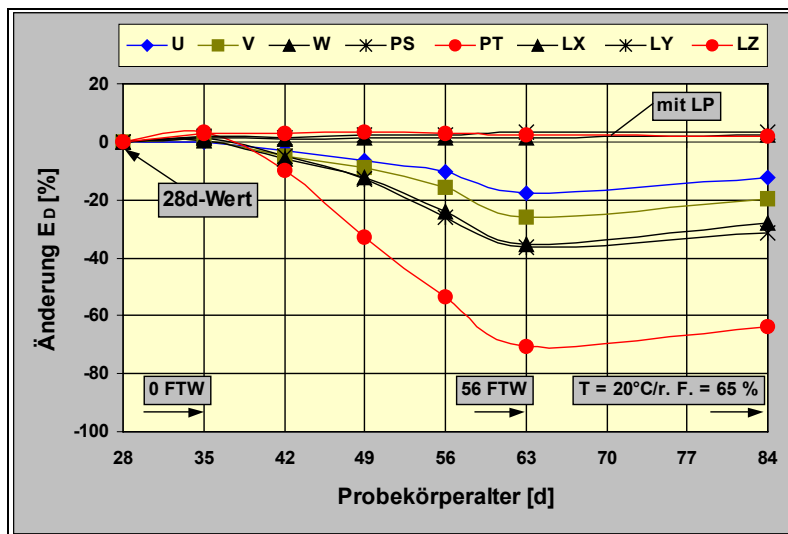


Bild 5.29: Änderung des dynamischen E-Moduls  $E_D$  der CEM I- Betone nach 56 FTW und anschließender Trockenlagerung im Normklima

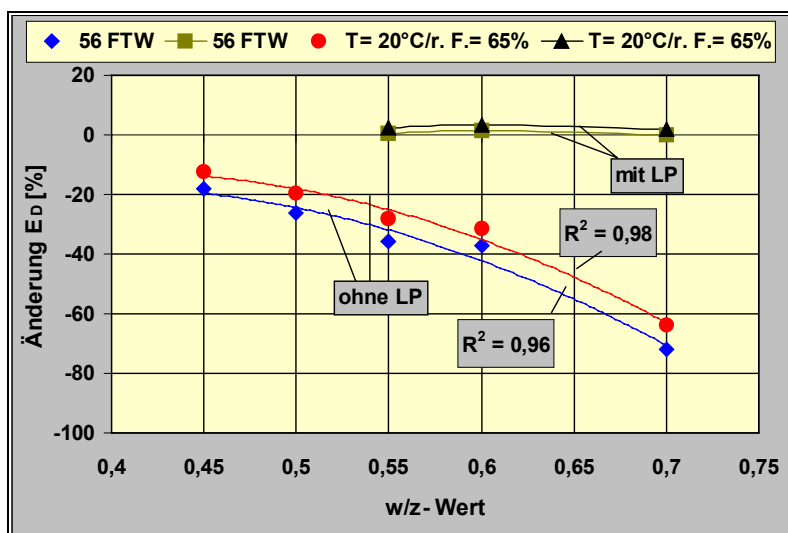


Bild 5.30: Änderung des dynamischen E-Moduls  $E_D$  der CEM I- Betone in Abhängigkeit vom w/z-Wert

Die berechneten Istwerte der dynamischen Querdehnzahl  $\mu_d$  nach dem kapillaren Saugen (0 FTW), 56 FTW und 21 Tagen Lagerung im Normklima (NK) bei  $T = 20^\circ \text{C}$  und  $r. F. = 65 \%$  für alle Versuchsbetone sind Tabelle 5.12 zu entnehmen. Die Änderung von  $\mu_d$  während der FTW-Prüfung und der anschließenden Trockenlagerung der CEM I- Betone beinhaltet Bild 5.31.



Tabelle 5.12: Querdehnzahl  $\mu_d$  der Versuchsbetone

CEM I 32,5 R				CEM III/A 32,5 NW-NA							
Serie	$\mu_d$ 0 FTW	$\mu_d$ 56 FTW	$\mu_d$ 21d NK	Serie	$\mu_d$ 0 FTW	$\mu_d$ 56 FTW	$\mu_d$ 21d NK	Serie	$\mu_d$ 0 FTW	$\mu_d$ 56 FTW	$\mu_d$ 21d NK
U	0,23	0,29	0,26	A_6	0,25	0,41	0,33	A_34	0,24	0,34	0,32
V	0,23	0,30	0,28	R_6	0,24	0,38	0,32	R_34	0,24	0,32	0,32
W	0,24	0,32	0,28	B_6	0,25	0,42	0,36	B_34	0,25	0,40	0,34
PS	0,25	0,31	0,28	S_6	0,25	0,38	0,34	S_34	0,25	0,40	0,34
PT	0,26	0,35	0,29	G_6	0,26	0,17	0,18	G_34	0,26	0,39	0,37
LI	n. b.	n. b.	n. b.	LD_6	0,26	0,25	0,25	LD_34	0,26	0,25	0,26
LX	0,23	0,25	0,24	LF_6	0,26	0,26	0,25	LF_34	0,26	0,25	0,26
LY	0,24	0,25	0,25	LS_6	0,27	0,28	0,27	LS_34	0,25	0,26	0,27
LZ	0,25	0,27	0,26	LT_6	0,27	0,28	0,27	LT_34	0,25	0,28	0,27

Die Querdehnzahl ändert sich erheblich bei den Betonen ohne LP-Mittel (Bild 5.31, links) mit zunehmender Wasseraufnahme und erreicht die größten Änderungen in Abhängigkeit vom w/z-Wert gegenüber dem Ausgangswert während der FTW-Prüfung.

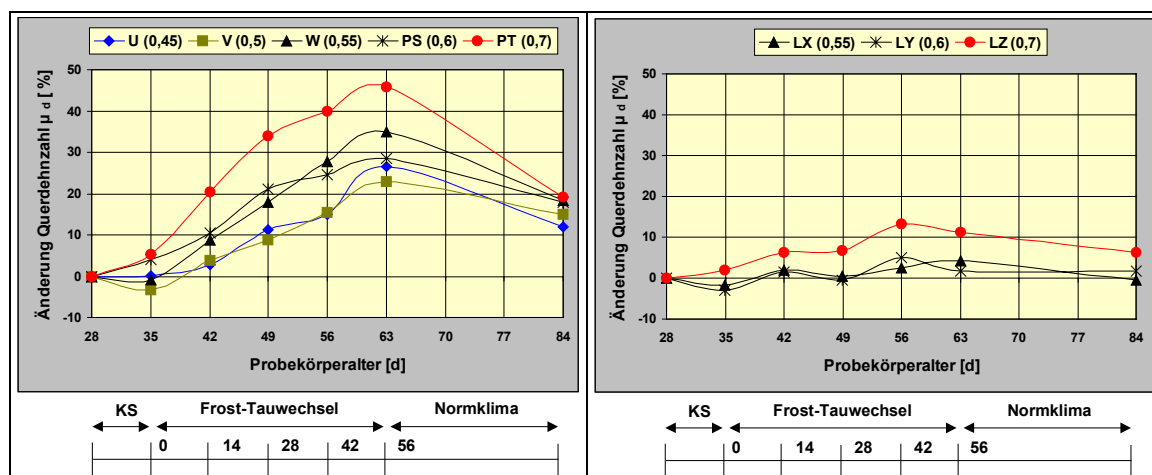


Bild 5.31: Änderung der Querdehnzahl der CEM I- Betone ohne (links) und mit (rechts) LP-Mittel während 56 FTW mit anschließender Trockenlagerung im Normklima

Unter Einbeziehung von Bild 5.8 und Bild 5.9 ist festzustellen, daß bei den LP-Betonen trotz vergleichbarer Wasseraufnahme während des kapillaren Saugens gegenüber den Betonen ohne LP-Mittel weder nach dem kapillaren Saugen noch während der FTW-Prüfung eine erhebliche Änderung von  $\mu_d$  eintritt. Die Trockenlagerung führt bei den

Betonen ohne LP-Mittel zu einer Reduzierung der Änderungen von  $\mu_d$ , ein irreversibler Anteil verbleibt als Änderung von  $\mu_d$  gegenüber dem Ausgangswert jedoch bestehen.

Die Diskussion der Versuchsergebnisse der CEM III/A- Betone führt zu ähnlichen Sachverhalten. Die eingetretenen Gefügeschädigungen sind gegenüber den CEM I- Betonen mit vergleichbarer Nachbehandlungsdauer deutlich höher, Bild 5.33. Die Begründung liegt in der langsamer verlaufenden Hydratation der CEM III/A- Betone gegenüber den CEM I- Betonen, so daß der erreichte Hydratationsgrad zum Zeitpunkt des Beginns der Prüfung des Frostwiderstandes und damit die eingetretene Festigkeitsentwicklung und Dichtheit des Betongefüges maßgeblichen Einfluß auf die entstehenden Gefügeschädigungen durch einen Frostangriff hat [3]. Bild 5.33 verdeutlicht den zunehmenden Abfall des dynamischen E-Moduls  $E_D$  mit ansteigenden w/z-Wert, wobei die Versuchsserie B\_6 einen im Vergleich zu den anderen Versuchsserien zu hohen E-Modulabfall zeigt. Die Änderung des dynamischen E-Moduls  $E_D$  während der 21-tägigen Trockenlagerung nach erfolgten 56 FTW kann Bild 5.32 entnommen werden. Es kann die Aussage getroffen werden, daß die Reserven zur Nachhydratation bei den CEM III/A-Betonen in Abhängigkeit von dem bereits erwähnten Hydratationsgrad zum Beginn der FTW-Prüfung stehen und demzufolge auch größer sind als bei den CEM I- Betonen. Fördernd wirkt die verbleibende Kernfeuchte im Betonprisma, die auch nach dieser Trockenlagerung noch vorhanden ist (siehe Schädigungsgradient).

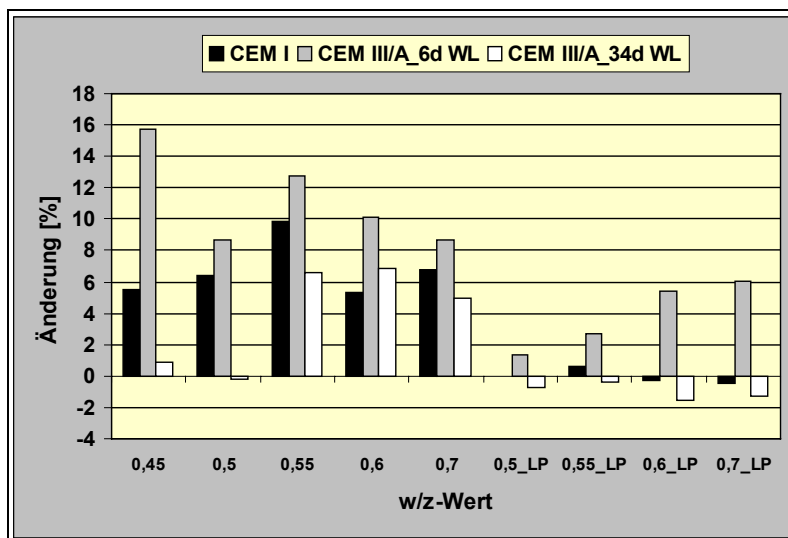


Bild 5.32: Änderung des dynamischen E-Moduls nach 21-tägiger Lagerung im Normklima bei  $T = 20\text{ °C}$ /  
r. F. = 65 % (nach 56 FTW)

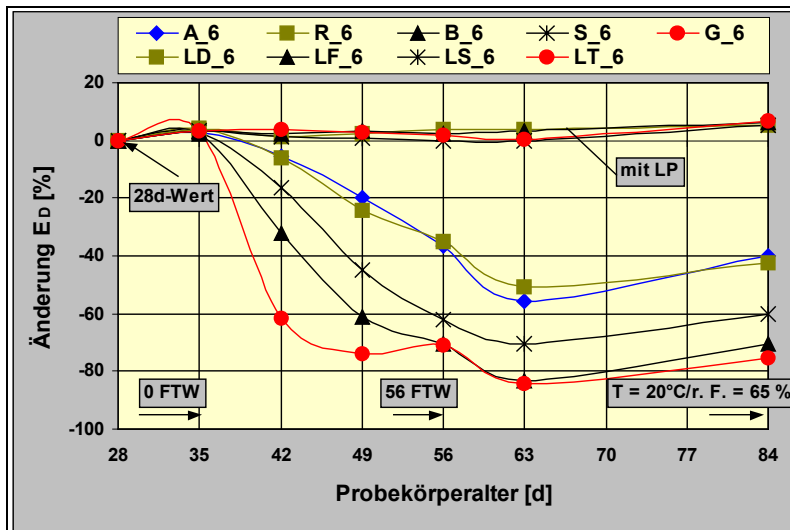


Bild 5.33: Änderung des dynamischen E-Moduls der CEM III/A-Betone nach 56 FTW und anschließender Trockenlagerung im Normklima nach dem Dehnwellenresonanzverfahren

Die Abhängigkeit des E-Modulabfalls vom  $w/z$ -Wert und der Nachbehandlungsdauer ist dem Bild 5.34 zu entnehmen.

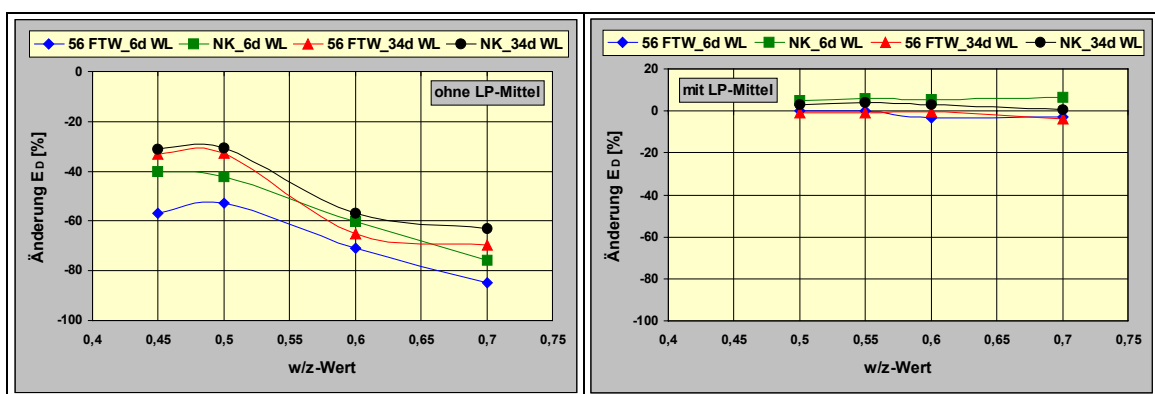


Bild 5.34: Änderung des dynamischen E-Moduls  $E_D$  der CEM III/A-Betone in Abhängigkeit vom  $w/z$ -Wert nach 56 FTW und 21 Tagen Lagerung im Normklima bei  $T = 20^\circ\text{C/r. F.} = 65\%$  und der Nachbehandlungsdauer<sup>19</sup>

Die Änderung der elastischen Eigenschaften des Betongefüges korreliert auch mit der Abnahme der Biegezugfestigkeit als mechanischer Kenngröße des Betons. Der ermittelte statistische Zusammenhang zwischen dynamischem E-Modul und Biegezugfestigkeit ist in Bild 5.35 dargestellt. Bild 5.36 vermittelt den Zusammenhang zur Änderung des dynamischen E-Moduls, hervorgerufen durch eine Frostschädigung, und der noch verbleibenden Biegezugfestigkeit nach erfolgter Prüfung des Frostwiderstandes. In der Versuchsdurchführung wurden Zemente gleicher Festigkeitsklasse verwendet, so daß Auswirkungen auf den zu diskutierenden Zusammenhang  $E_{\text{dyn}}$  und  $\beta_{\text{BZ}}$  aus Unter-

<sup>19</sup> Kurvenverlauf ohne Einbeziehung der Versuchsserie B\_6 und B\_34

schieden im Verlauf der Festigkeitsentwicklung zwischen CEM I und CEM III entstehen bzw. aus dem Einfluß der Nachbehandlungsdauer (siehe auch Bild 5.19).

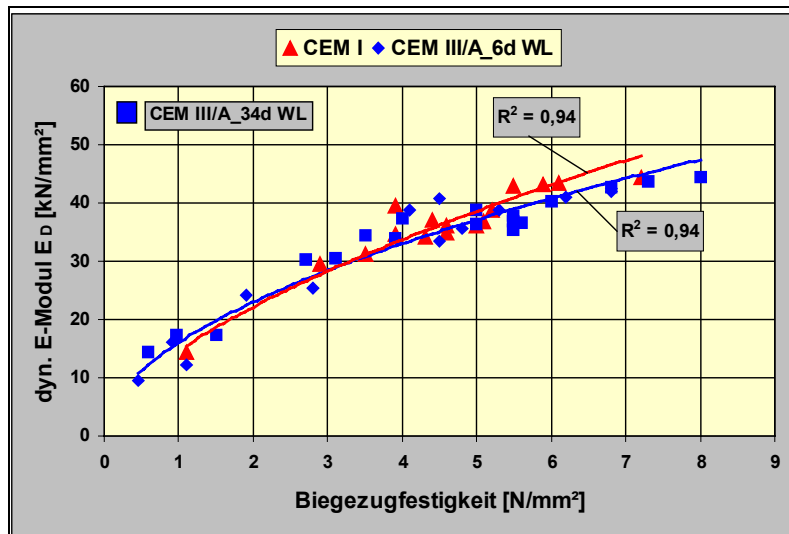


Bild 5.35: Zusammenhang zwischen dynamischem E-Modul  $E_D$  und Biegezugfestigkeit geschädigter und ungeschädigter Probekörper

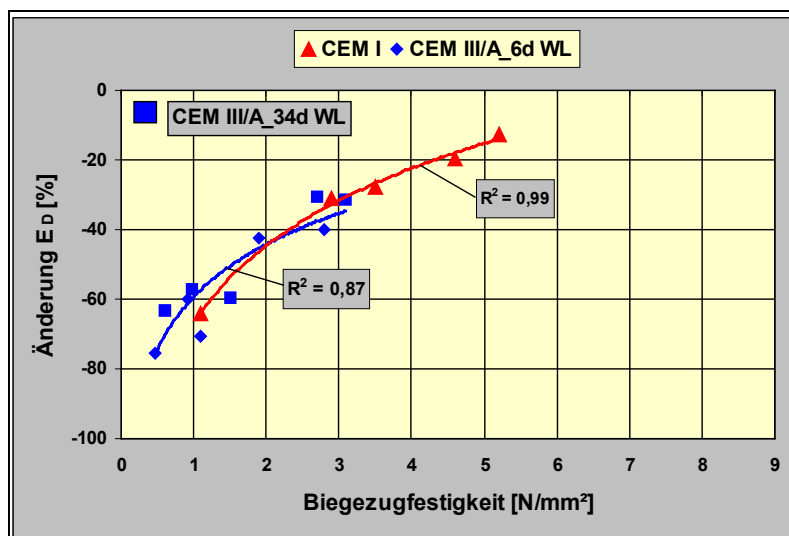


Bild 5.36: Zusammenhang zwischen der Änderung des dynamischen E-Moduls und der Biegezugfestigkeit geschädigter Probekörper

Abnehmende elastische Eigenschaften korrelieren ebenfalls mit der Abnahme der Biegezugfestigkeit. Gefügeschädigungen durch Frosteinwirkung führen zur Mikrorißbildung im Zementstein bzw. schwächen den Haftverbund zwischen Zementstein und Zuschlag. Technisch relevante E-Moduländerungen von 40 % sind verbunden mit einer Absenkung der Biegezugfestigkeit auf Werte zwischen 2 bis 3 N/mm<sup>2</sup>, unabhängig von der für die Untersuchungen verwendeten Zementart bzw. diese Änderung der Biegezugfestigkeit liegt im Bereich von 60 bis 70 % Änderung des dynamischen E-Moduls. Die

Biegezugfestigkeit reagiert somit empfindlicher auf Gefügeschädigungen als der dynamische E-Modul. E-Moduländerungen von 60 bis 70 % verursachen Änderungen der Biegezugfestigkeit von 80 bis 90 %. Vergleichbare Untersuchungen wurden von AUBERG [10] durchgeführt.

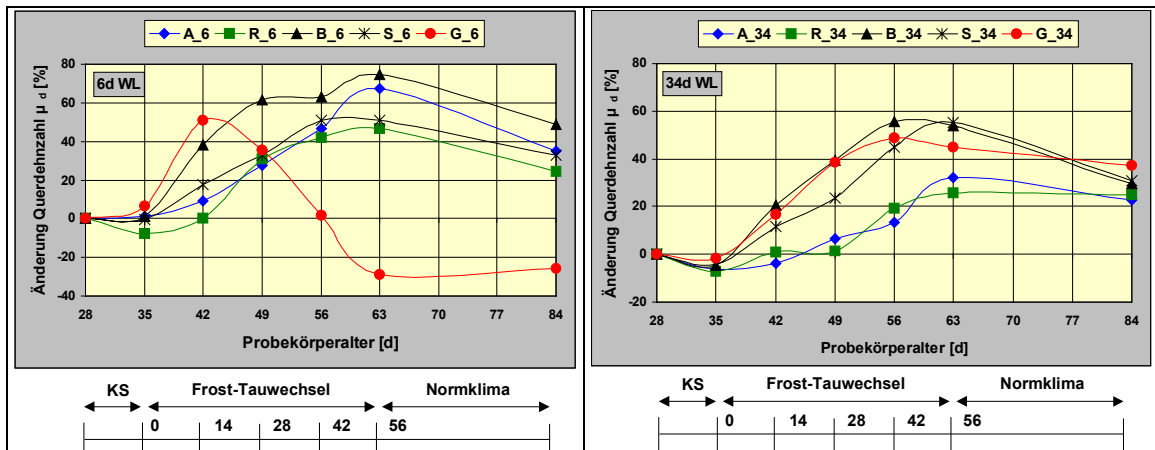


Bild 5.37: Dynamische Querdehnzahl der CEM III/A- Betone in Abhängigkeit vom w/z-Wert, der Nachbehandlungsdauer, nach 56 FTW und 21 Tagen Lagerung im Normklima bei  $T = 20\text{ °C}$ /r.F. = 65%

Die Änderungen der dynamischen Querdehnzahl  $\mu_d$  führt bei den CEM III/A- Betonen, Bild 5.37, zu vergleichbaren Zusammenhängen wie bei den CEM I- Betonen. Geringfügige Änderungen nach dem kapillaren Saugen gehen in einen steilen Anstieg von  $\mu_d$  während der FTW-Prüfung über. Der Ausgangswert der Versuchsserie R\_6 ändert sich von  $\mu_d = 0,25$  ( $V_r = 2,9\%$ ) auf einen Wert von  $\mu_d = 0,37$  ( $V_r = 3,7\%$ ) nach 56 FTW. Die 21-tägige Lagerung im Normklima führt zu einer Reduzierung von  $\mu_d$  auf einen Wert von  $\mu_d = 0,32$  ( $V_r = 1,7\%$ ). AL-ABIDIEN [57] ordnet der dynamischen Querdehnzahl eine umgekehrte Abhängigkeit von stofflichen Einflußgrößen (z.B. w/z-Wert, Porosität, Zementart) zu, wie dem dynamischen E-Modul. Untersuchungen an Mörtelprismen zur baustofftechnischen Realisierbarkeit des Massenbetons der Gewichtsstaumauer Leibis/Lichte von BURKERT [169] bestätigen diese Abhängigkeit. Es wurden Eigenschwingzeitmessungen an Normprismen  $4 \times 4 \times 16\text{ cm}^3$  zur Bestimmung der elastischen Kennwerte  $E_D$ ,  $E_B$ ,  $G_T$  und  $\mu_d$  durchgeführt, Bild 5.38. Die NP waren bis zur Messung des 180d-Wertes einer durchgängigen Wasserlagerung ausgesetzt. Die verwendeten Zemente entsprechen der gleichen Festigkeitsklasse ( $32,5\text{ N/mm}^2$ ), wie bei allen anderen Versuchen. Mit dem Anstieg des dynamischen E-Moduls während der untersuchten Hydratationszeit tritt eine kontinuierliche Abnahme der dynamischen Querdehnzahl  $\mu_d$  ein. Die Kurvenverläufe im Bild 5.37 bestätigen diese Aussage im wesentlichen. Der mit der Gefügeschädigung eintretende E-Modulabfall ist mit einem Anstieg von  $\mu_d$  verbunden. Die Betonprismen der Versuchsserie G\_6 weichen aufgrund des hohen Schädigungsgrades von dieser Verhaltensweise ab. So tritt nach 14 FTW,  $\mu_d = 0,37$ , bereits eine Abnahme von  $\mu_d$  ein, die sich weiter fortsetzt und zu einem  $\mu_d$ -Wert

von 0,18 ( $V_r = 21\%$ ) führt. Die hohe Gefügeschädigung führt somit zu einer Versprödung des Betons.

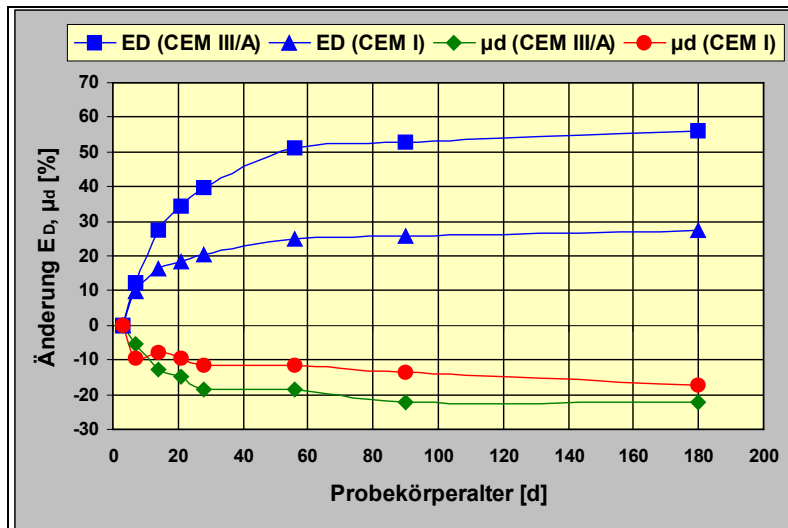


Bild 5.38: Eigenschwingzeitmessungen an Mörtelprismen zum Verlauf von  $E_D$  und  $\mu_d$  in Abhängigkeit von der Hydratationszeit

Die LP-Betone (Bild 5.39, links) mit 6 Tagen Nachbehandlung führen zu einem geringen Anstieg von maximal 10 % von  $\mu_d$ , bei einem relativen Variationskoeffizient  $V_r$  von 2 bis 3 %. Die Lagerung im Normklima führt wieder zu einer Abnahme von  $\mu_d$  auf Maximalwerte von 5 %, außer der Versuchsserie LD\_6, die tendenziell eine geringe Abnahme von  $\mu_d$  anzeigt. Die LP-Betone (Bild 5.39, rechts) mit verlängerter Nachbehandlung führen generell zu einer geringen Abnahme während der FTW-Prüfung, die jedoch nach 21 Tagen Lagerung im Normklima als reversibel einzustufen ist.

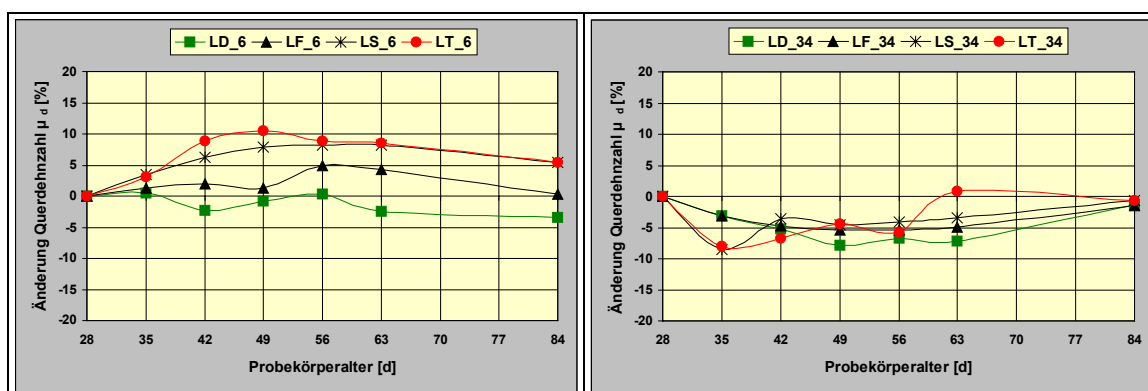


Bild 5.39: Dynamische Querdehnzahl  $\mu_d$  der LP-Betone während der FTW-Prüfung und 21 Tagen Lagerung Normklima bei  $T = 20\text{ °C/R}$ .  $F. = 65\%$ , 6 Tage Nachbehandlung (links), 34 Tage Nachbehandlung (rechts)

In Bild 5.40 bis Bild 5.43 wurde der Vergleich zwischen den angewendeten Meßverfahren zur Erfassung der inneren Schädigung durchgeführt. Zum Nachweis der Signifikanz der Mittelwertunterschiede wurde der doppelte T-Test angewendet. Dem T-Test

vorangestellt ist die Prüfung auf Varianzgleichheit nach dem einseitigen F-Test, mit der Forderung  $F_{4;4(0,05)} < 6,39$ . Diese Bedingung wurde bei allen Versuchsserien erfüllt. In einem ersten Schritt wurden die Mittelwerte des E-Moduls der CEM III/A- Betone bezüglich des Einflusses der Nachbehandlung überprüft. Tabelle 5.13 gibt einen Überblick zu den berechneten  $\hat{t}_b$ - Werten. Die Forderung  $\hat{t}_b > \hat{t}_{T(FG,\alpha)}$  zum Nachweis der Signifikanz der Mittelwertunterschiede wird nur von der Versuchsserie LD\_6 nicht erfüllt.

Tabelle 5.13:  $\hat{t}_b$  - Werte der CEM III/A- Betone zur Bewertung des Einflusses der Nachbehandlung

FG = 8, $\alpha = 0,05$ $\hat{t}_T = 2,31$	A_6/ A_34	R_6/ R_34	B_6/ B_34	S_6/ S_34	G_6/ G_34	LD_6/ LD_34	LF_6/ LF_34	LS_6/ LS_34	LT_6/ LT_34
$\hat{t}_{b, 56 \text{ FTW}}$	7,52	9,36	7,82	5,75	9,03	0,68	10,13	5,64	8,33
$\hat{t}_{b, \text{NK}}$	3,99	6,12	9,92	2,40	4,94	2,85	5,50	2,59	3,21

Im nächsten Schritt wurden die Meßverfahren Dehnwellenresonanz und Eigenschwingzeitmessung auf Signifikanz der Mittelwertunterschiede überprüft. Die Auswertung der berechneten  $\hat{t}_b$ - Werte, Tabelle 5.14, ergibt, daß zwischen den untersuchten Meßverfahren bei den Versuchsserien A\_6, R\_6 und B\_6 keine signifikanten Unterschiede der Mittelwerte von  $E_D$  und  $E_B$  nach 56 FTW bestehen. Der Vergleich der Meßergebnisse nach 21 Tagen Lagerung im Normklima führt bei allen Versuchsserien zu signifikanten Unterschieden der Mittelwerte von  $E_D$  und  $E_B$  (Einfluß Schädigungsgradient). Die verlängerte Wasserlagerung bestätigt nur bei der Versuchsserie A\_34 nach 56 FTW, daß die Meßwertunterschiede zufällig sind, alle anderen Versuchsserien einschließlich der Bewertung der Lagerungsart (NK) ergeben signifikante Unterschiede der bewerteten Meßverfahren. Die berechneten Mittelwerte beider Meßverfahren unterscheiden sich nach 0 FTW durchschnittlich um 4,3 %. Die entstehenden Unterschiede nach erfolgter FTW-Prüfung betragen in Abhängigkeit vom Schädigungsgrad 10 bis 30 %. Dies begründet sich zum einen mit der Anregungsart der mechanischen Schwingungen und zum anderen mit der angeregten Wellenart. Bei auftretenden Gefügeschädigungen hat die angeregte Wellenart den dominanten Einfluß. Die Biegewelle führt analog der Biegezugfestigkeit zur Beanspruchung der sensibelsten Bereiche im Betongefüge, den Phasengrenzflächen zwischen Zementstein und Zuschlag.

Tabelle 5.14:  $\hat{t}_b$  - Werte zur Bewertung der Meßverfahren

FG = 8, $\alpha = 0,05$ $\hat{t}_T = 2,31$	DW/BW A_6	DW/BW R_6	DW/BW B_6	DW/BW S_6	DW/BW G_6	DW/BW LD_6	DW/BW LF_6	DW/BW LS_6	DW/BW LT_6
$\hat{t}_{b\ 56\ \text{FTW}}$	0,38	1,65	1,47	4,68	12,39	11,6	6,62	8,07	6,40
$\hat{t}_{b\ \text{NK}}$	4,53	4,34	14,42	7,95	21,88	15,5	13,26	n. b.	n. b.
FG = 8, $\alpha = 0,05$ $\hat{t}_T = 2,31$	DW/BW A_34	DW/BW R_34	DW/BW B_34	DW/BW S_34	DW/BW G_34	DW/BW LD_34	DW/BW LF_34	DW/BW LS_34	DW/BW LT_34
$\hat{t}_{b\ 56\ \text{FTW}}$	1,70	7,00	2,67	5,27	3,11	1,28	3,37	n. b.	11,39
$\hat{t}_{b\ \text{NK}}$	3,41	12,86	7,76	15,3	4,08	5,00	7,68	n. b.	n. b.

Der Vergleich zwischen allen drei angewendeten Prüfverfahren, Dehnwellenresonanz, Biegewellenresonanz (Eigenschwingzeit) und CIF-Test führt zu folgenden Ergebnissen:

- Alle drei Meßverfahren zeigen den Schädigungsverlauf in gleicher Differenzierung bezüglich des Einflusses der Zementart, des w/z-Wertes und der Nachbehandlungsdauer richtig an (Bild 5.40, Bild 5.41, Bild 5.43).
- Die Korrelation zwischen den Resonanzverfahren und dem CIF-Test führt zu der Aussage, daß durch die Resonanzverfahren Änderungen im Betongefüge (dynamischer E-Modul) früher erkannt werden. Mit zunehmender Gefügeschädigung werden die Unterschiede zwischen Ultraschall und Resonanzfrequenz größer und nehmen bei hohen Gefügeschädigungen wieder ab. Durch die Biegewellenresonanz werden die Unterschiede gegenüber dem Ultraschallverfahren weiter verstärkt, Bild 5.42. Im Bereich von 35 bis 40 % Änderung von  $E_{\text{dyn}}$  (DW, BW) treten um 15 bis 18 % geringere Änderungen von  $E_{\text{rel}}$  (CIF) auf. AUBERG [10] ermittelte Differenzen zwischen dem Resonanzverfahren und dem CIF-Test von 15 bis 18 % bezogen auf einen Abfall des relativen dynamischen E-Moduls im Bereich von ca. 25 bis 40 %. Die ermittelten Differenzen zwischen Ultraschall- und Resonanzverfahren werden bei einem E-Modulabfall > 60 % mit zunehmender Gefügeschädigung geringer.
- Die Streuung der Meßwerte nimmt bei allen Prüfverfahren mit zunehmender Schädigung zu, Tabelle 5.4, Tabelle 5.6 und Tabelle 5.8.
- Die dynamische Querdehnzahl  $\mu_d$  erreicht nach 21 Tagen Lagerung im Normklima bei den Betonen ohne LP-Mittel, außer bei den Versuchsserien, B\_6, G\_6 und G\_34, Werte von 0,32 bis 0,33. Dies bedeutet unter Einbeziehung des Ausgangswertes von 0,25 bis 0,26 eine Reduzierung des k-Werte entsprechend Gleichung (2.8) von 0,82 auf 0,70, wodurch eine Änderung von  $E_{\text{dyn}}$  nach Gleichung (2.8) von rechnerisch 12 % entsteht. Die Änderung des  $M_a$ -Wertes in Gleichung (2.14) beträgt nach KOTTAS [37] < 1 %. Diese Betrachtung ist noch fehlerhaft, da die Überein-



stimmung der Feuchtegehalte bzw. Feuchteverteilung zwischen dem 28d-Wert vor KS und der 21-tägigen Lagerung im Normklima nach Frost nicht gegeben ist und der diskutierte Einfluß der Gefügeschädigung auf  $\mu_d$  noch durch unterschiedliche Feuchtegradienten beeinflußt wird.

- Der meßtechnische Aufwand zur Erfassung der inneren Schädigung ist bei der Eigenschwingzeitmessung (bei Bestimmung einer Wellenart) und dem CIF-Test vergleichbar gering. Dadurch sind die Voraussetzungen gegeben, diese Meßverfahren auch im Rahmen von Normprüfungen einzusetzen. Das Dehnwellenresonanzverfahren eignet sich gut unter den gegebenen Meßbedingungen während einer Frostprüfung zur Berechnung der dynamischen Querdehnzahl. Die Verwendung des Butylbandes verhindert die Anregung anderer Wellenarten bei der Anwendung der Eigenschwingzeitmessung.
- Die Anwendung der Resonanzverfahren führt zum Zeitpunkt der Messung zur Bewertung des gesamten Probekörpers, der CIF-Test ermittelt Gefügeänderungen in einer Durchschallungsachse, die einen definierten Abstand zur Prüffläche hat. Dies hat den Vorteil, daß die Schädigung im Randbereich der Probenrückseite keinen Einfluß auf den ermittelten Schädigungsgrad hat. Den Schädigungsgrad und die Schädigungstiefe im Randbereich der Prüffläche zu kennen, ist jedoch für die Kalibrierung der Meßverfahren im Hinblick auf eine praxisrelevante Prüfung von Beton-Bauwerke wichtig, die in ihrem Nutzungszeitraum dem Prozeß der Trocknung und Wiederbefeuchtung im erhöhtem Maße ausgesetzt sind. Hieraus leitet sich die Überlegung ab, bei Anwendung von Resonanzverfahren einen höheren E-Modulabfall als in der ZTV-W, LV 219 [161] vorgeschlagen, generell in Betracht zu ziehen oder die Anzahl der notwendigen FTW in Abhängigkeit vom Erreichen des Grenzwertes für einen zulässigen E-Modulabfall zu reduzieren.

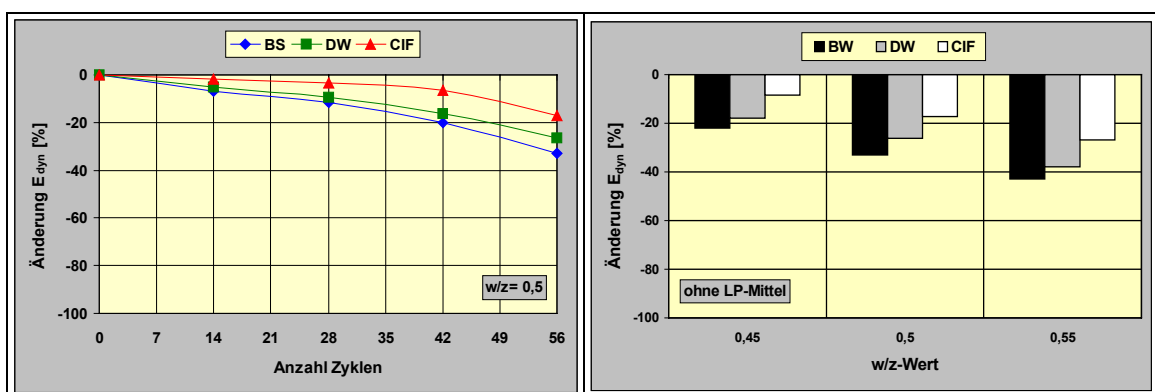


Bild 5.40: Vergleich der Meßverfahren, Kurvenverläufe während 56 FTW (links), Änderung nach 56 FTW (rechts) der CEM I- Betone

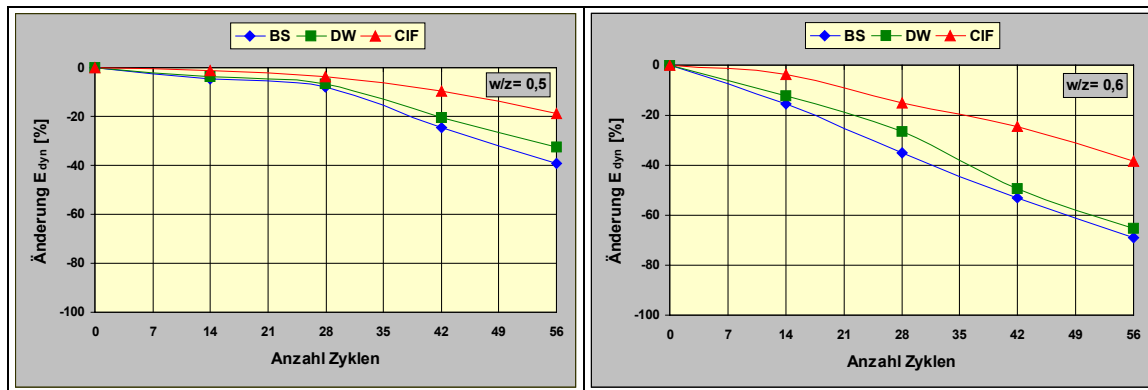


Bild 5.41: Vergleich der Meßverfahren, Kurvenverläufe der CEM III/A- Betone, Nachbehandlung 34 Tage Wasserlagerung, links  $w/z = 0,5$ ; rechts  $w/z = 0,6$

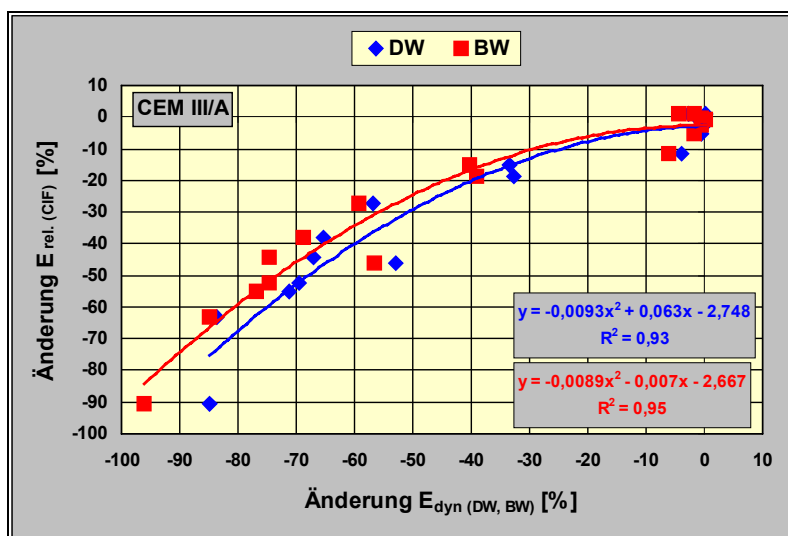


Bild 5.42: Vergleich der Änderungen des dynamischen E-Moduls nach 56 FTW der CEM III/A- Betone zwischen Resonanz- und Ultraschallverfahren

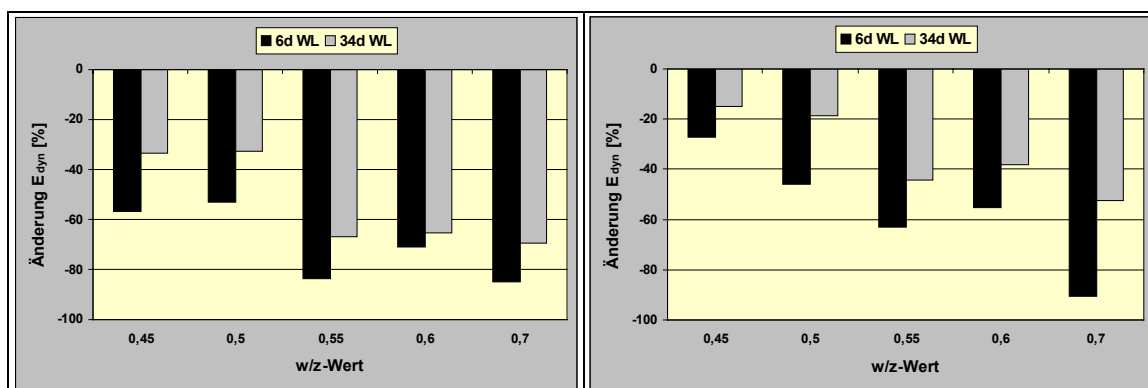


Bild 5.43: Einfluß der Nachbehandlungsdauer, ermittelt mit dem Dehnwellenresonanzverfahren (links) und dem CIF-Test (rechts)

### ♦ Dämpfung

Zur Erfassung von Gefügeschädigungen wurden Voruntersuchungen zur Bestimmung der Dämpfung während der FTW-Prüfung durchgeführt. Dies erfolgte an digitalisierten Zeitsignalen (Abklingkurven) der Eigenschwingzeitmessung, die mittels FFT analysiert wurden. Berechnet wurde der Q-Faktor als Dämpfungsmaß der Biegewellenresonanz (Grundschwingung). Die angewendeten Digitalisierungsbedingungen ergaben eine Auflösung im Frequenzbereich von 3,25 Hz. Zur genauen Bestimmung der Frequenzen  $f_1$  und  $f_2$  in den Schnittpunkten der Resonanzkurve in Höhe  $1/\sqrt{2}$  wurde zwischen den zwei benachbarten Frequenzwerten des jeweiligen Schnittpunktes interpoliert. Bild 5.44 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchungen an CEM III/A- und CEM III/B- Betonen ( $w/z = 0,5$ ) mit und ohne LP-Mittel. Die Wasseraufnahme während der 28 FTW führt bei den LP-Betonen bereits zu einer Änderung des Q-Faktors von 40 bis 50 %. Die Änderung des dynamischen E-Moduls  $E_B$  beträgt bei dem CEM III/A- Beton + 0,9 % und bei dem CEM III/B- Beton -2,0 %. Die Betone ohne LP-Mittel verdeutlichen eine hohe, nahezu lineare Änderung des Q-Faktors während der 28 FTW von 70 bis 80 %.  $E_B$  ändert sich bei den CEM III/A-Betonen um -23 % und bei den CEM III/B- Betonen um -28 % nach 28 FTW gegenüber dem Ausgangswert von  $E_B$  bei 0 FTW. Bild 5.45 belegt, daß bedingt durch die hohe Kapillarporosität der Versuchsserie G\_6 und LT\_6 ( $w/z = 0,7$ ), die Wasseraufnahme während des kapillaren Saugens zu einem Abfall des Q-Faktors von ca. 50 % führt. Die Kurvenverläufe zeigen, daß bereits sehr geringe Gefügeänderungen mit hohen Änderungen des Q-Faktors und im Schädigungsfall hohe Gefügeschädigungen, die in einem schnellen Schädigungsfortschritt entstehen, nur mit geringen Änderungen des Q-Faktors verbunden sind, so daß im kritischen Bereich von 40 % E-Moduländerung für die Bewertung unterschiedlicher Betone nur geringe Differenzierungsmöglichkeiten bestehen. Eine feinere Untergliederung des Prüfprozesses in kürzere Prüfintervalle ist bei Dämpfungsmessungen sicher sinnvoll. Die Definition von Abbruchkriterien für die Prüfung des Frostwiderstandes könnte den höheren Prüfaufwand mindern. In der späteren Versuchsplanung (Bild 5.1) wurde deshalb nur die Auswertung von  $E_B$  der Biegewelle berücksichtigt. Die Berechnung des Dämpfungsmaßes kann jedoch als eine sehr sensible Methode zur Erfassung von Gefügeschädigungen eingestuft werden. Vergleichbare Untersuchungen wurden von VOKES, CLARKE und JANSSEN [43] sowie AUBERG [10] vorgenommen.

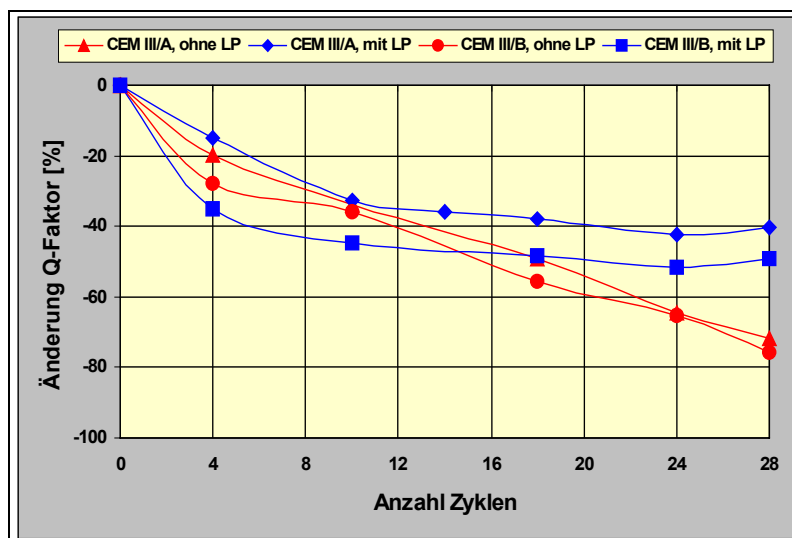


Bild 5.44: Änderung des Q-Faktors von CEM III-Betonen ( $w/z = 0,5$ ) mit und ohne Zusatz von LP-Mitteln während 28 FTW

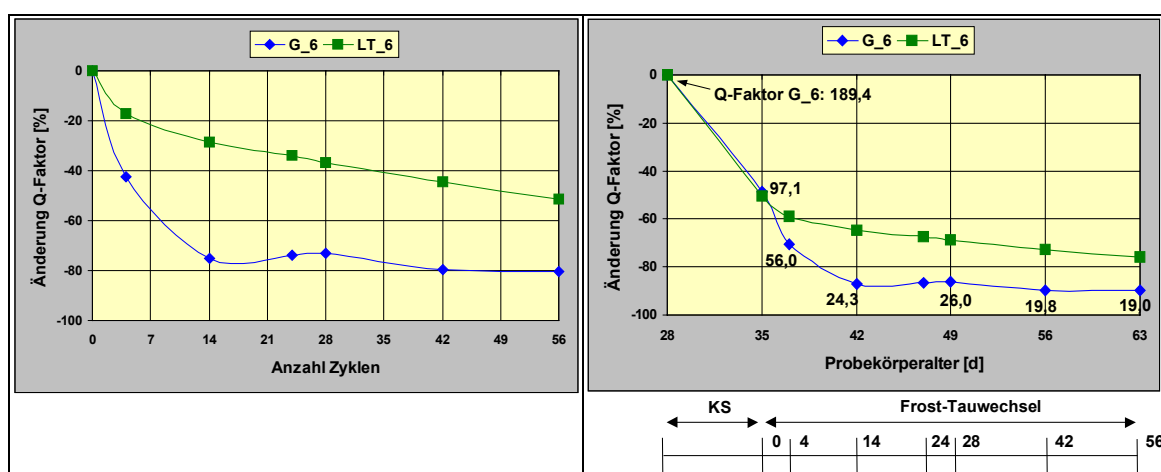
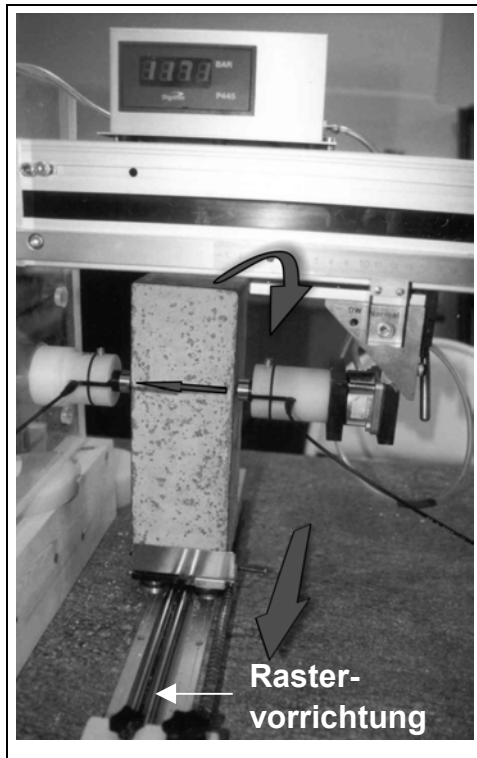


Bild 5.45: Änderung des Q-Faktors der CEM III/A-Betone,  $w/z$ -Wert 0,7; Nachbehandlung 6 Tage, mit LP-Mittel (LT\_6) und ohne LP-Mittel (G\_6), links: 0 bis 56 FTW, rechts: 28d-Wert bis 21 Tagen Normlagerung nach 56 FTW

### ◆ Schädigungsgradient

Der Bestimmung des Schädigungsgradienten wurde<sup>^^</sup> im Rahmen des Versuchsprogramms eine besondere Bedeutung beigemessen. Deshalb wurden versuchstechnisch die Voraussetzungen geschaffen, den zu untersuchenden Probekörper zwischen den Schallwandlern, die als Tastspitzen (trockene Ankopplung) ausgebildet sind, so zu führen, daß eine Schädigung, ausgehend von der Prüffläche, über die Höhe des Probekörpers reproduzierbar gemessen werden kann, Bild 5.46. Der Abstand der Durchschallungsachsen betrug 0,5 cm. Insgesamt wurden 14 Messungen pro Meßreihe durchgeführt. Ermittelt wurden 2 Schädigungsgradienten pro Probekörper jeweils im Abstand von 7 cm von den Stirnflächen. Dazu wurde der Probekörper so gedreht, daß die Prüffläche immer zum Prüfer zeigt. Untersucht wurden 3 Probekörper zu den Zeitpunkten

vor KS (28d-Wert), nach KS, nach 56 FTW und nach 21 Tagen Lagerung im Normklima bei  $T = 20\text{ °C}$ , r. F. = 65 % (Vergleich zum 28d-Wert). Um eine Aussage zum Schädigungsfortschritt zu erhalten, wurde zusätzlich 1 Probekörper pro Versuchsserie der CEM III/A- Betone nach 28 FTW untersucht.



*Bild 5.46: Positionierung des Probekörpers zur Bestimmung des Schädigungsgradienten, Prüffläche vorn, Führung des Probekörpers in einer Vorrichtung mit Rasterung des Meßpunktabstandes*

Die konzipierte Meßvorrichtung ermöglicht durch einen mechanisch geführten Transportschlitten die Bewegung des Probekörpers. Nach erfolgter Durchschallung an einem Meßpunkt rastet die Führung des Transportschlittens in der vorgegebenen Rasterung (eingefräßte Schlitz) ein. Ein Edelstahlblech, ausgebildet als Anschlag, verhindert einen Versatz des Meßrasters bei Wiederholungsmessungen.

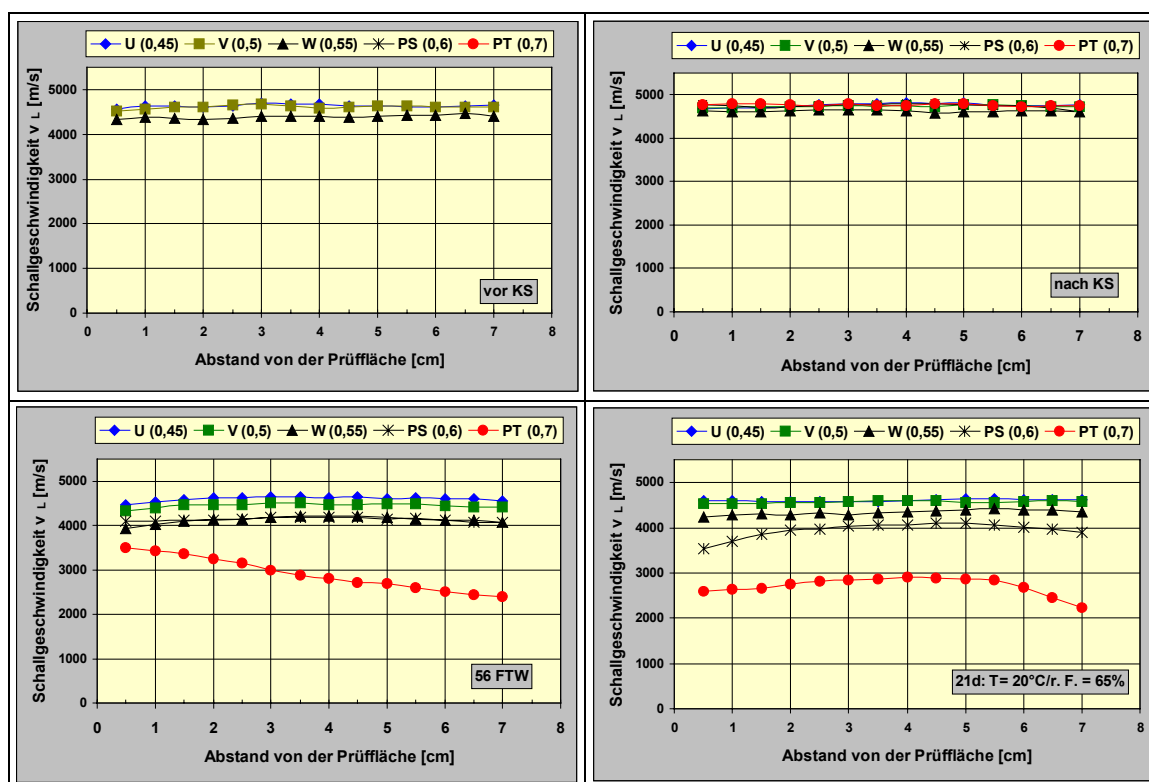
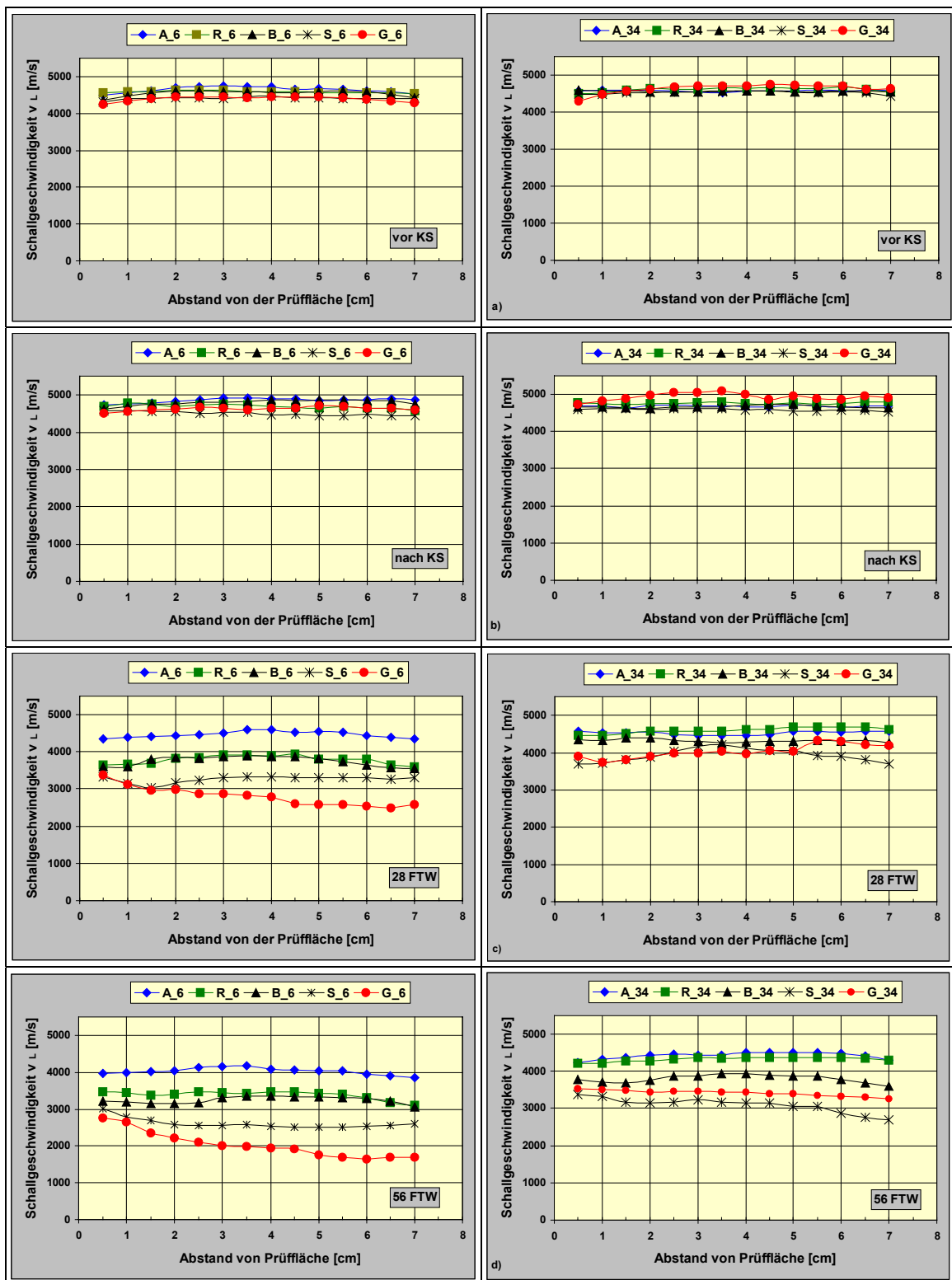


Bild 5.47: Schädigungsgradienten der CEM I- Betone ohne LP-Mittel

Bild 5.47 vermittelt einen Überblick zu den erzielten Versuchsergebnissen der CEM I- Betone ohne LP-Mittel. Die Messungen vor KS und nach KS können noch keinen Gradienten an den untersuchten Probekörpern, weder material- noch herstellungsbedingt belegen. Geringfügige Unterschiede der gemessenen Schallgeschwindigkeit entstehen durch den w/z-Wert und eine stärkere Austrocknung der Probekörper in den Randbereichen. Nach 56 FTW tritt eine deutlichere Differenzierung in den Kurvenverläufen auf, der Einfluß des w/z-Wertes auf die eingetretene Gefügeschädigung wird sichtbar. Die Versuchsserie PS zeigt entgegen den Erwartungen eine relativ geringe Änderung der Schallgeschwindigkeit ohne Ausbildung eines Gradienten. Die Versuchsserie PT vermittelt eine hohe Gefügeschädigung über die gesamte Probenhöhe, die in den Randbereichen eingetretene Schädigung wird durch eine erhöhte Wasseraufnahme überdeckt und täuscht gegenüber dem Kernbereich des Probekörpers eine geringere Schädigung vor. Die Meßreihen nach 21 Tagen Lagerung im Normklima führen zu dem erwarteten Ergebnis, daß auch bei der Versuchsserie PS verstärkt in den Randbereichen eine erhöhte Wasserabgabe auftritt und somit dort eine stärkere Schädigung gegenüber dem Kernbereich vorliegt. Die Versuchsserie PT ist durch eine hohe Schädigungstiefe, verbunden mit einer ebenfalls hohen Schädigung der Rückseite des Probekörpers, gekennzeichnet. Der Kernbereich hebt sich nur geringfügig von dem von der Prüffläche ausgehenden Schädigungsgrad ab. Eine längere Trockenlagerung würde im Randbereich der Prüffläche noch zu einem weiteren Absinken der Schallgeschwindigkeit führen.



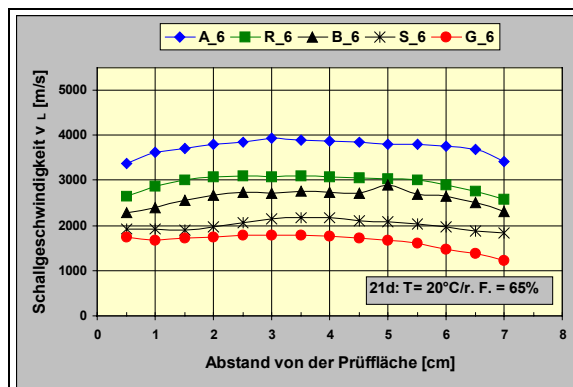


Bild 5.48: Schädigungsgradienten der CEM III/A-Betone mit 6 Tagen Nachbehandlung

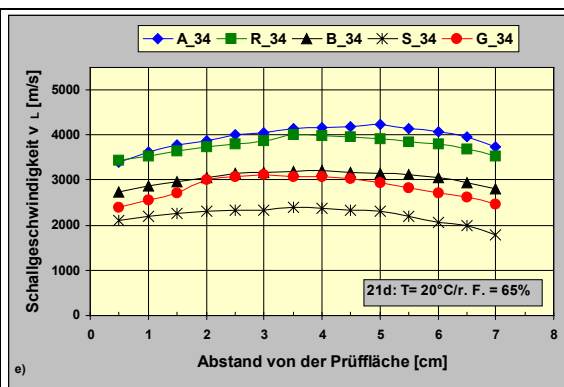


Bild 5.49: Schädigungsgradienten der CEM III/A-Betone mit 34 Tagen Nachbehandlung

Die Diskussion der Schädigung soll anhand der Schallgeschwindigkeitsmessungen an den Versuchsserien mit CEM III/A-Zement weiter vertieft werden. Bild 5.48 und Bild 5.49 beinhalten die aufgenommenen Meßreihen zu den CEM III/A-Betonen mit dem Vergleich des Einflusses der angewendeten Nachbehandlungsdauer. Auch bei diesen Meßreihen werden geringe Unterschiede in den Kurvenverläufen vor KS und nach KS nur durch den Einfluß des w/z-Wertes und unterschiedlicher Austrocknung der Probekörper in den Randbereichen sichtbar. Die Kurvenverläufe zeigen bei höherer Spreizung der y-Achse einen Abfall der Schallgeschwindigkeit von ca. 1 bis 2 % durch eine höhere Austrocknung in den Randbereichen (bis ca. 2 cm Tiefe) gegenüber dem Kernbereich. Diese reduzieren sich nach dem kapillaren Saugen auf Werte < 1 % bzw. es entsteht durch die Wasseraufnahme ein nahezu geradliniger Kurvenverlauf mit geringfügig höheren Schallgeschwindigkeitswerten. Die verlängerte Nachbehandlung führt insgesamt zu geringeren Unterschieden in den diskutierten Kurvenverläufen. Das dichtere Gefüge führt aufgrund der geringeren Wasseraufnahme zu einer geringeren Differenzierung bei den gemessenen Schallgeschwindigkeiten. Da die Kurven nach dem kapillaren Saugen im gesamten Niveau zu höheren Schallgeschwindigkeiten angehoben sind, muß von einer Feuchtaufnahme bzw. Verteilung der Feuchtigkeit über den gesamten Querschnitt des Probekörpers ausgegangen werden. Eine quantitative Bestimmung der Feuchteverteilung im Zusammenhang mit den ablaufenden Feuchtetransportprozessen über den Querschnitt des Probekörpers ist bisher meßtechnisch nicht realisiert worden.

Nach 28 FTW tritt aufgrund der bereits ausgelösten hohen Gefügeschädigung bei den Versuchsserien S\_6 und G\_6 eine zunehmende Wasseraufnahme im Randbereich der Prüffläche auf, die sich bei der Versuchsserie G\_6 bis in den Kernbereich des Probekörpers fortsetzt. Das dichtere Gefüge der vergleichbaren Versuchsserien S\_34 und G\_34 zeigt noch keine verstärkte Wasseraufnahme im Randbereich der Prüffläche. Nach 56 FTW ist eine weitere Differenzierung in Abhängigkeit vom w/z-Wert eingetreten, alle Kurvenverläufe sind aufgrund der eingetretenen Gefügeschädigungen zu niedrigeren Schallgeschwindigkeiten verschoben, die hohe Wasseraufnahme in den Randbereichen der Prüffläche der Versuchsserien S\_6 und G\_6 wird weiter verstärkt.



Die verlängerte Nachbehandlung führt bei den vergleichbaren Versuchsserien nur bei S\_34 zu einem geringen Anstieg der Wasseraufnahme im Randbereich der Prüffläche. Die Versuchsserie G\_34 zeigt entgegen den Erwartungen eine geringere Gefügeschädigung als die Versuchsserie S\_34.

Die Kurvenverläufe nach 21 Tagen Lagerung im Normklima führen aufgrund der Austrocknung der Randbereiche des Probekörpers zu einem deutlichen Absinken der Schallgeschwindigkeit. Die Versuchsserien A\_6, R\_6 und B\_6 zeigen die erwartete Ausbildung eines Schädigungsgradienten mit einem höheren Abfall der Schallgeschwindigkeit in den Randbereichen. Dieser Abfall würde bei einer längeren Trockenlagerung im Randbereich der Prüffläche noch höher ausfallen (Versuchsserie S\_6, G\_6). Die verlängerte Nachbehandlung führt bei den Versuchsserien A\_34 und R\_34 zu einem deutlich ausgeprägten Schädigungsgradienten mit höheren  $v_L$ -Werten. Hier wird die höhere Schädigung des Randbereiches der Prüffläche gegenüber der Rückseite deutlich sichtbar. Mit zunehmendem w/z-Wert (höherer Kapillarporenanteil) erfolgt auch bei diesen Versuchsserien durch die FTW-Prüfung eine schnellere Wassersättigung des Probekörpers. Die eintretende kritische Wassersättigung wirkt sich zuerst in der Randzone der Prüffläche aus, die weiter fortschreitende Schädigung erfaßt den Kernbereich und führt zu einem nahezu vollständig geschädigten Probekörper (S\_34). Gefügeschädigungen im Bereich der Probenrückseite können zum einen durch eine fortschreitende Schädigung von der Prüffläche über den Kernbereich ausgelöst und zum anderen separat durch die sich einstellenden Temperatur- und Feuchteverhältnisse an der Probenrückseite verursacht werden. Eine Temperaturbelastung kann nur über die definierte Fläche des Probekörpers erfolgen. HARTMANN [154] ermittelte, daß eine gleichmäßige Temperaturverteilung über den Querschnitt durch einen nahezu parallelen Verlauf der Isothermen zur Prüffläche vorliegt. In der Gefrierphase entstehen bei einer Minimaltemperatur an der Prüffläche von  $-17,1^\circ\text{C}$  an der Probenrückseite Temperaturen von  $-15^\circ\text{C}$ . Eine Feuchteaufnahme wird vorwiegend durch den Feuchtegehalt der umgebenden Luft ausgelöst. Eine Beanspruchung an der Probenrückseite ist somit hinsichtlich einer Frostschädigung im geringeren Maße vorhanden. In Bild 5.50 wurde die Änderung von  $v_L^2$  nach 21 Tagen Lagerung im Normklima (nach Frost) als Bezugsgröße zum relativen dynamischen E-Modul in den ausgewählten Durchschallungsachsen vorgenommen. Der bereits diskutierte Sachverhalt wird nochmals verdeutlicht. Probekörper mit niedriger Schädigung im Kernbereich (A\_34) zeigen einen ausgeprägten Schädigungsgradienten mit den höchsten Schädigungen im Bereich der Prüffläche. Mit zunehmender Schädigung des Kernbereiches (B\_34  $\rightarrow$  B\_6, S\_34  $\rightarrow$  S\_6), ausgehend von der Prüffläche, werden die Unterschiede geringer, die hohe Schädigung im Bereich der Prüffläche wird noch von dem vorhandenen Wasser in den Kapillarporen verdeckt [170, 171, 172, 173].

Zur Überprüfung des Trocknungseffektes nach 21 Tagen Lagerung im Normklima wurden durch Spalten entsprechende Probekörper hergestellt. Aus der Mitte eines Prismas wurde ein Probekörper der Abmessungen von ca.  $80 \times 80 \times 20 \text{ mm}^3$  durch Spalten erzeugt, der wiederum in 3 rechteckige Proben gespalten wurde. Die ermittelte

Massedifferenz vor und nach Trocknung bei 105°C ergab, daß bei den untersuchten Prismen eine höhere Kernfeuchte und somit ein Feuchtegradient vorliegt. Eine Bewertung dieser Ergebnisse ist aufgrund fehlender Bezugswerte jedoch schwer möglich. Die gemessenen Schallgeschwindigkeiten der Längsdurchschallung (Durchschallungsachse mittig) zeigen ebenfalls einen Abfall an, außer den Versuchsserien mit hoher Gefügeschädigung (B\_6, S\_6, G\_6 mit hoher Kernfeuchte). Die bereits diskutierte Zunahme des dynamischen E-Moduls nach 21 Tagen Lagerung im Normklima (nach Frost) wird wesentlich durch den Anstieg der Frequenzwerte (Dehnwellenresonanz, Eigenschwingzeit) und im geringeren Maße durch die Abnahme der Dämpfung (Trocknung der Randbereiche) verursacht.

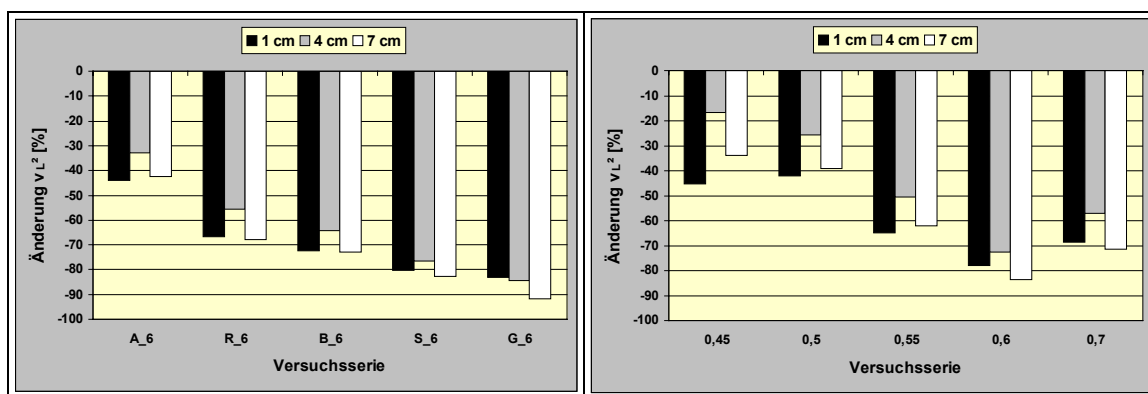


Bild 5.50: Auswertung von  $v_L^2$  unterschiedlicher Durchschallungsachsen nach 21 Tagen Lagerung im Normklima bei  $T = 21^\circ \text{C/r. F.} = 65 \%$  nach 56 FTW, Versuchsserien der CEM III/A- Betone mit 6 Tagen Nachbehandlung (links), mit 34 Tagen Nachbehandlung (rechts)

Ein Versuch zur Visualisierung der Schädigungsgradienten der untersuchten Probekörper als zusammenhängende Darstellung wurde im Bild 5.51 bis Bild 5.60 vorgenommen. Die gemessenen 6 Schädigungsgradienten pro Versuchsserie wurden zu einer bildlichen Darstellung zusammengesetzt. Die Verteilung von  $v_p$ <sup>20</sup> über die Balkenhöhe entspricht den ermittelten Meßreihen, der Abstand zwischen den Rasterlinien ist eine fiktive Größe. Die Skalierung der y-Achse wurde für die Darstellung „relativ“ so gewählt, daß alle gemessenen  $v_p$ -Werte aller Versuchsserien erfaßt werden können. Damit sind Vergleichsmöglichkeiten zwischen den Versuchsserien gegeben. Die Darstellung „absolut“ stellt nur die Änderung der  $v_p$ -Werte, bezogen auf den untersuchten Probekörper, dar. Die Auswertung der Abbildungen kann unter Anwendung folgenden Bewertungskriterien vorgenommen werden:

- Übereinstimmung des Schädigungsverlaufes der drei untersuchten Probekörper einer Versuchsserie (z.B. Bild 5.55, rechts im Bild, eine Probe zeigt eine niedrigere Schädigung im Kernbereich)

<sup>20</sup> Verwendung  $v_p$  anstelle  $v_L$ , da Software für SG-Grafiken keine Tiefstellung von Indizes ermöglicht

- Auftreten eines Schädigungsgradienten in der Versuchsserie (z.B. Bild 5.51, Bild 5.56, Bild 5.57)
- Mit der Darstellung des Schädigungsgradienten wird die Schädigung in den Randbereichen sichtbar (z.B. Bild 5.56), die in Übereinstimmung mit den im Bild 5.50 ersichtlichen Randschädigungen steht.<sup>21</sup>

Die in Bild 5.51 angegebene Lage der Prüffläche (Frostangriff) und der Rückseite des Probekörpers ist bis Bild 5.60 identisch.

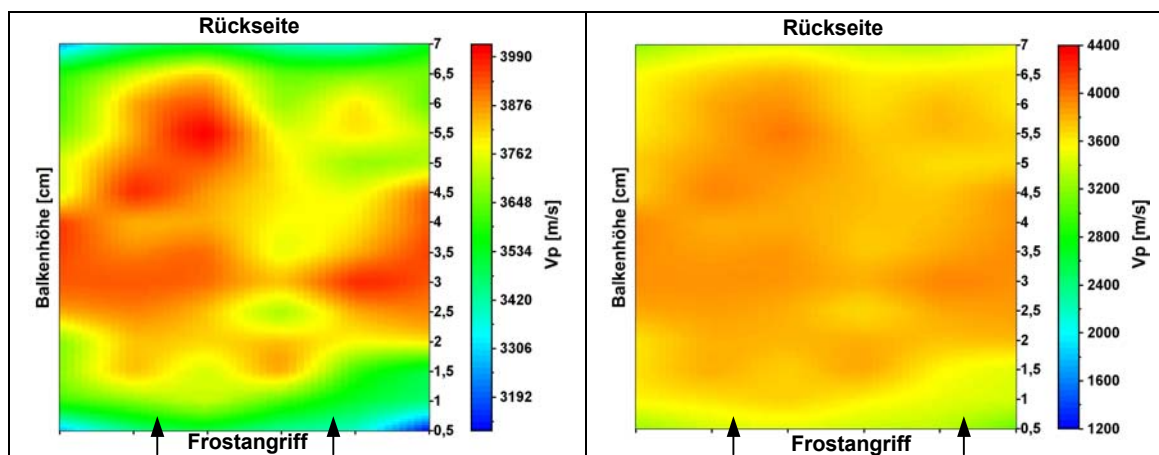


Bild 5.51: Schädigungsgradient Serie A<sub>6</sub> (CEM III/A,  $w/z = 0,45$ ; 6d NB), Skalierung absolut (links), Skalierung relativ (rechts), Verteilung von  $v_p$  nach 56 FTW und 21d Normlagerung

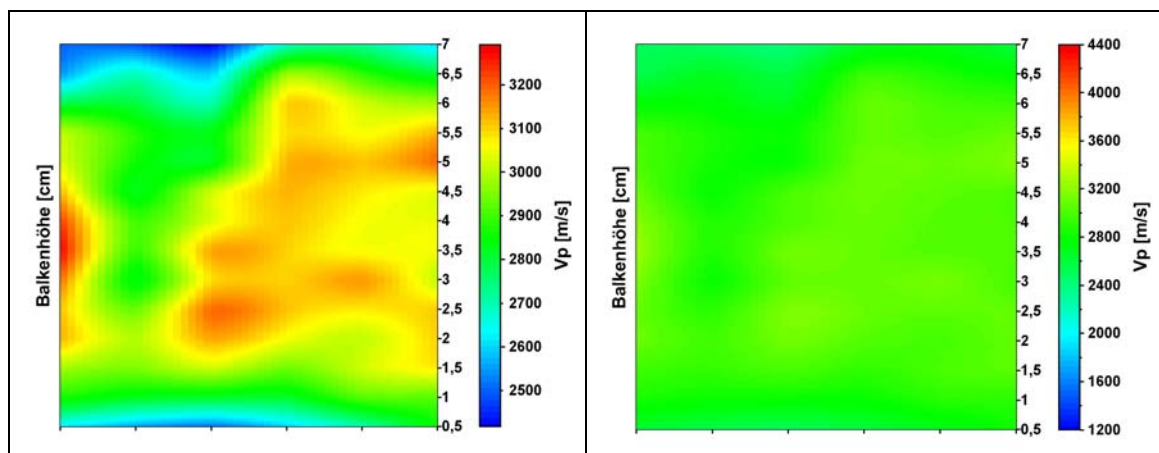


Bild 5.52: Schädigungsgradient Serie R<sub>6</sub> (CEM III/A,  $w/z = 0,5$ ; 6d NB), Skalierung absolut (links), Skalierung relativ (rechts), Verteilung von  $v_p$  nach 56 FTW und 21d Normlagerung

<sup>21</sup> Prüffläche für Frostangriff im Bild 5.51 bis Bild 5.60 identisch

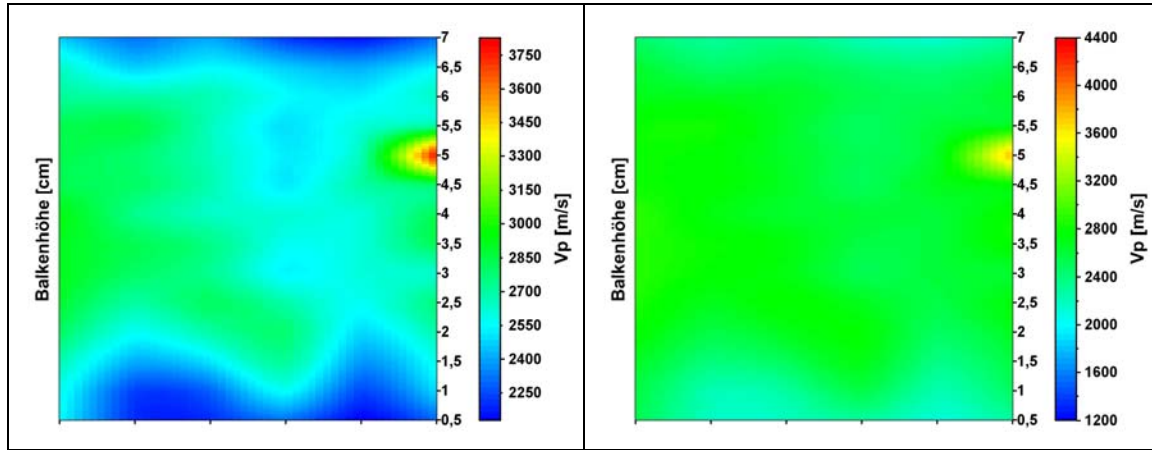


Bild 5.53: Schädigungsgradient Serie B\_6 (CEM III/A,  $w/z = 0,55$ ; 6d NB), Skalierung absolut (links), Skalierung relativ (rechts), Verteilung von  $v_p$  nach 56 FTW und 21d Normlagerung

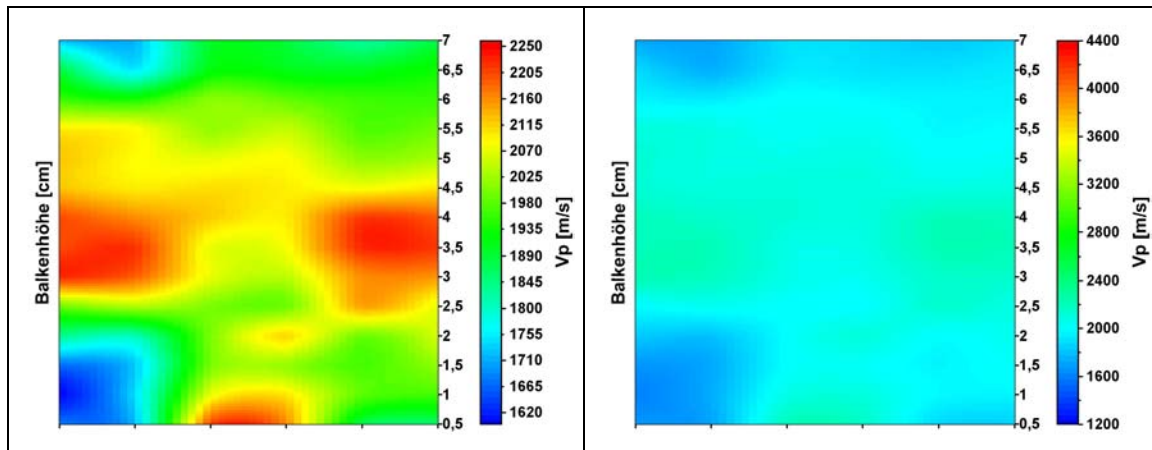


Bild 5.54: Schädigungsgradient Serie S\_6 (CEM III/A,  $w/z = 0,6$ ; 6d NB), Skalierung absolut (links), Skalierung relativ (rechts), Verteilung von  $v_p$  nach 56 FTW und 21d Normlagerung

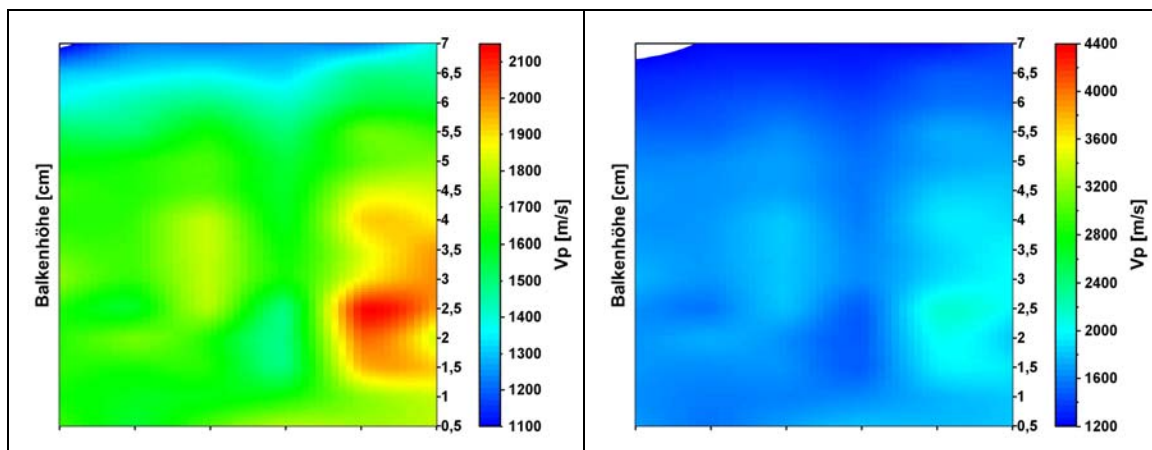


Bild 5.55: Schädigungsgradient Serie G\_6 (CEM III/A,  $w/z = 0,7$ ; 6d NB), Skalierung absolut (links), Skalierung relativ (rechts), Verteilung von  $v_p$  nach 56 FTW und 21d Normlagerung

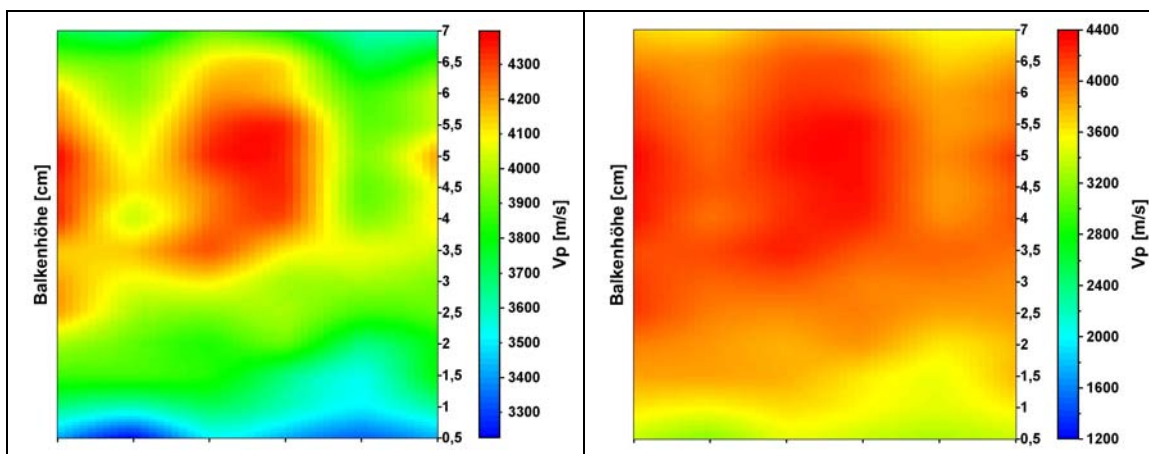


Bild 5.56: Schädigungsgradient Serie A\_34 (CEM III/A,  $w/z = 0,45$ ; 34d NB), Skalierung absolut (links), Skalierung relativ (rechts), Verteilung von  $v_p$  nach 56 FTW und 21d Normlagerung

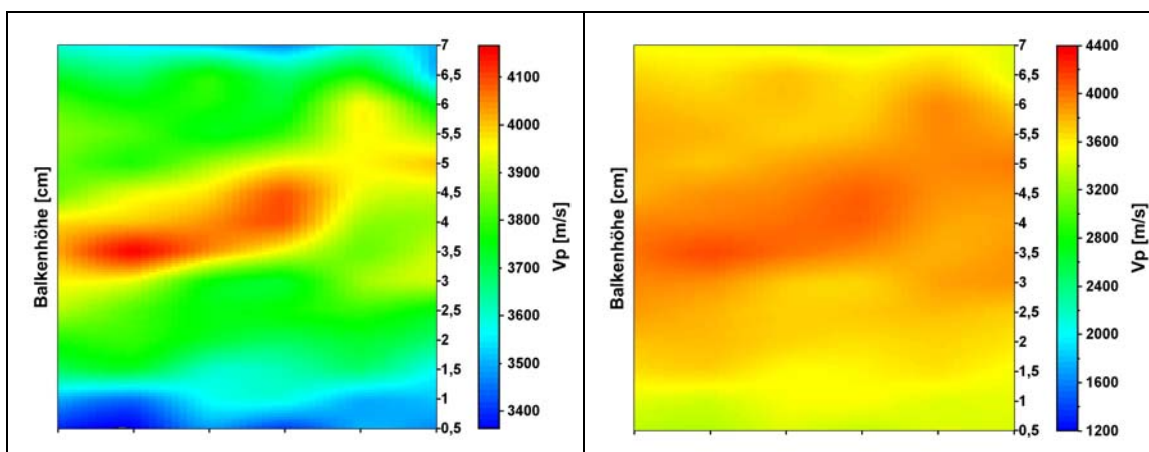


Bild 5.57: Schädigungsgradient Serie R\_34 (CEM III/A,  $w/z = 0,5$ ; 34d NB), Skalierung absolut (links), Skalierung relativ (rechts), Verteilung von  $v_p$  nach 56 FTW und 21d Normlagerung

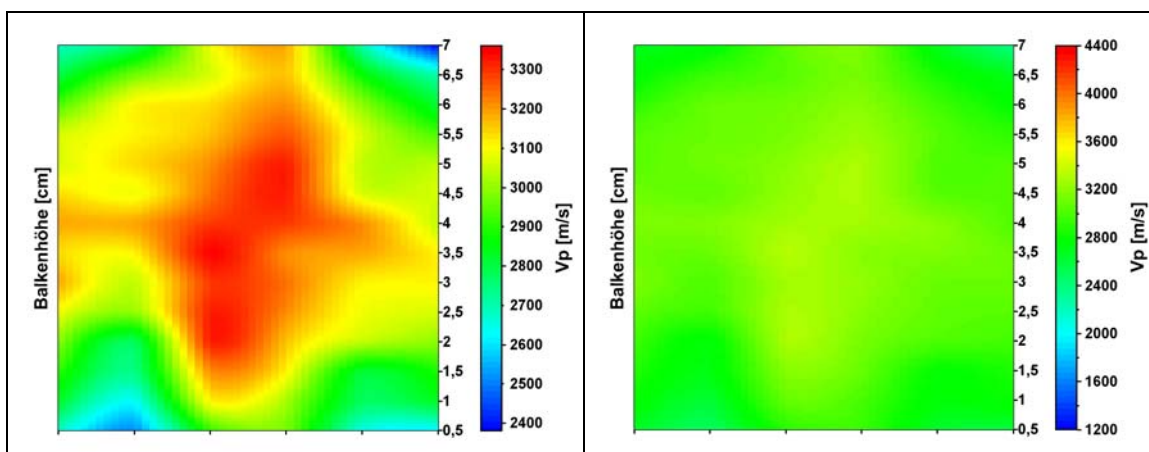


Bild 5.58: Schädigungsgradient Serie B\_34 (CEM III/A,  $w/z = 0,55$ ; 34d NB), Skalierung absolut (links), Skalierung relativ (rechts), Verteilung von  $v_p$  nach 56 FTW und 21d Normlagerung



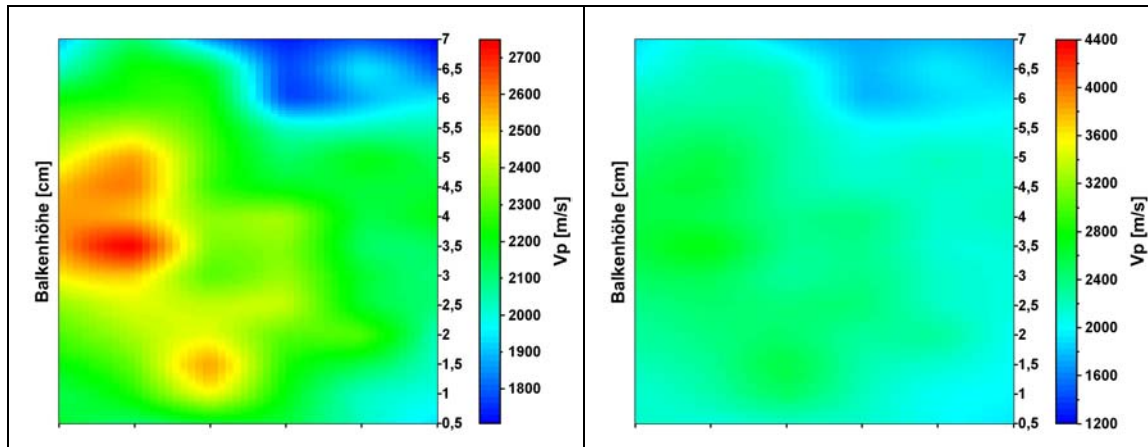


Bild 5.59: Schädigungsgradient Serie S\_34 (CEM III/A, w/z = 0,6; 34d NB), Skalierung absolut (links), Skalierung relativ (rechts), Verteilung von  $v_p$  nach 56 FTW und 21d Normlagerung

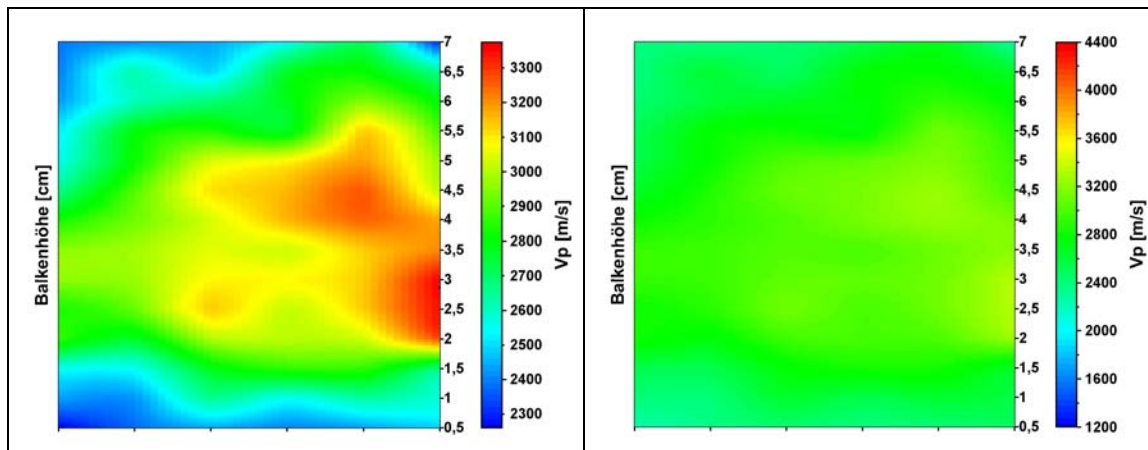
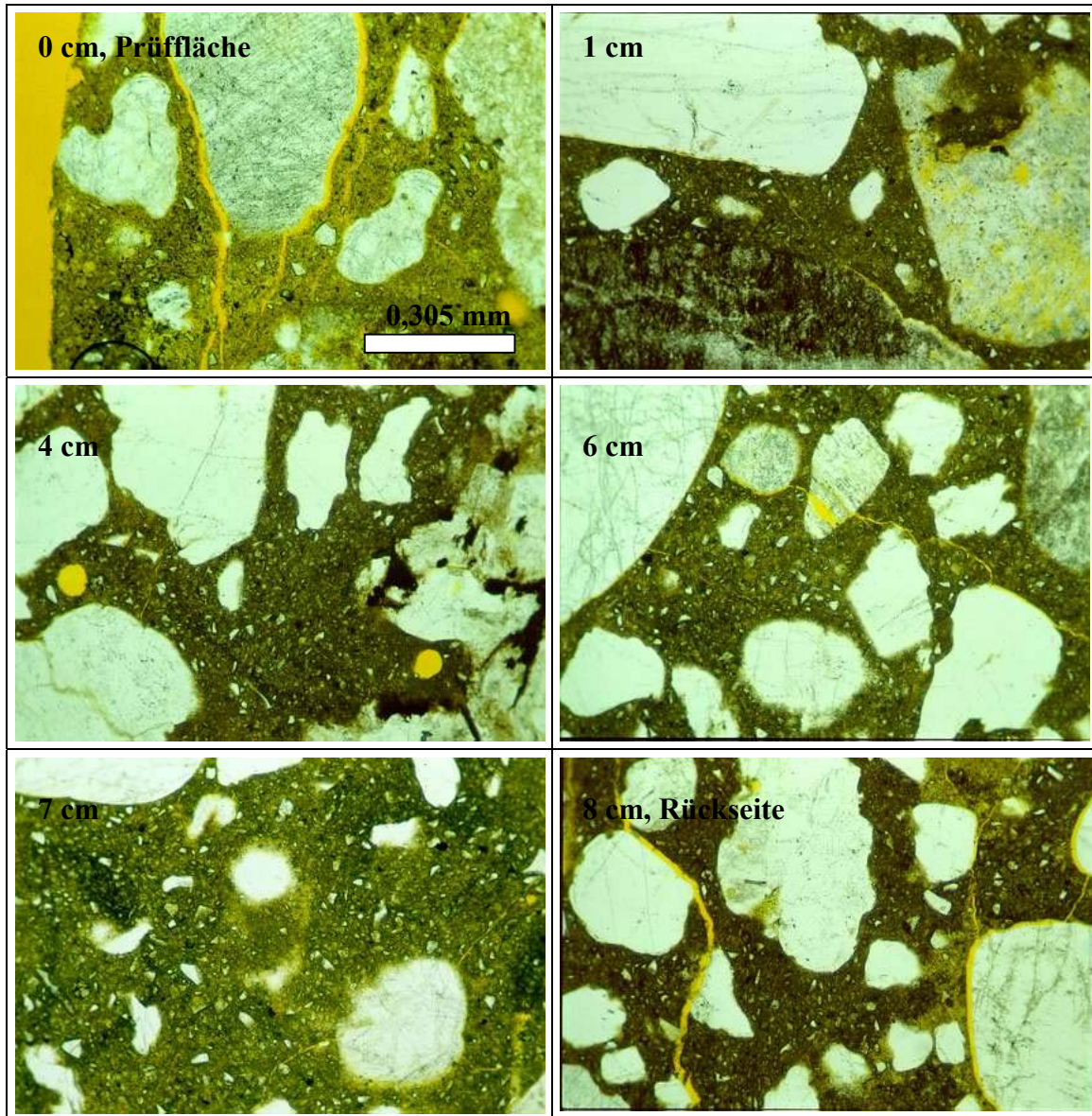


Bild 5.60: Schädigungsgradient Serie G\_34 (CEM III/A, w/z = 0,7; 34d NB), Skalierung absolut (links), Skalierung relativ (rechts), Verteilung von  $v_p$  nach 56 FTW und 21d Normlagerung

In der Weiterführung der Untersuchungen zur Darstellung eines Schädigungsgradienten wurden Dünnschliffe angefertigt, um die Rißverteilung auszuwerten. Leider standen zum Zeitpunkt der Auswertung keine automatisch arbeitenden Bildanalyseverfahren zur Verfügung, so daß die Auswertungen am Dünnschliff subjektiv beeinflusst sind. Die Entwicklung eines derartigen Bildanalyseverfahren ist jedoch äußerst problematisch, da die Bewertung der Risse in den unterschiedlichsten Ausbildungsformen nicht von im Gefüge vorhandenen Porenstrukturen vielfältigster Art getrennt werden kann. Dünnschliffe wurden von je einem Probekörper der Versuchsserien A\_34, B\_34 und S\_34 hergestellt. Die Entnahme der Probe erfolgte aus dem mittleren Bereich des Betonprismas. Untersucht wurde die gesamte Querschnittshöhe über eine Breite von 70 mm, so daß im Dünnschliff eine Querschnittsfläche von 80 x 70 mm<sup>2</sup> abgebildet wurde. Die Auswahl der Dünnschliffotos (Bild 5.61 bis Bild 5.63) erfolgte im Abstand von der Prüffläche bei 0, 1, 2, 4, 6, 7 und 8 cm (Probenrückseite). Die Bilder wurden mit Hilfe eines Durchlichtmikroskops, Typ JENALAB. Bei einer 10fachen Vergrößerung stellt

das Dia (36 x 24) mm<sup>2</sup> einen Bildausschnitt von 1,1 x 0,7 mm<sup>2</sup> dar, das heißt 1 cm  $\hat{=}$  0,305 mm. Bild 5.61 bis Bild 5.63 wurden ausgehend von der Originalgröße des Dias mit einer Vergrößerung von 210 % in die Arbeit eingefügt.



*Bild 5.61: Darstellung des Schädigungsgradienten am Dünnschliff durch Ausschnittsvergrößerungen in unterschiedlichen Abständen von der Prüffläche des befestigten Probekörpers bei 10facher Vergrößerung, Versuchsserie A\_34 (CEM III/A, w/z = 0,45; Nachbehandlung 34 Tage)*



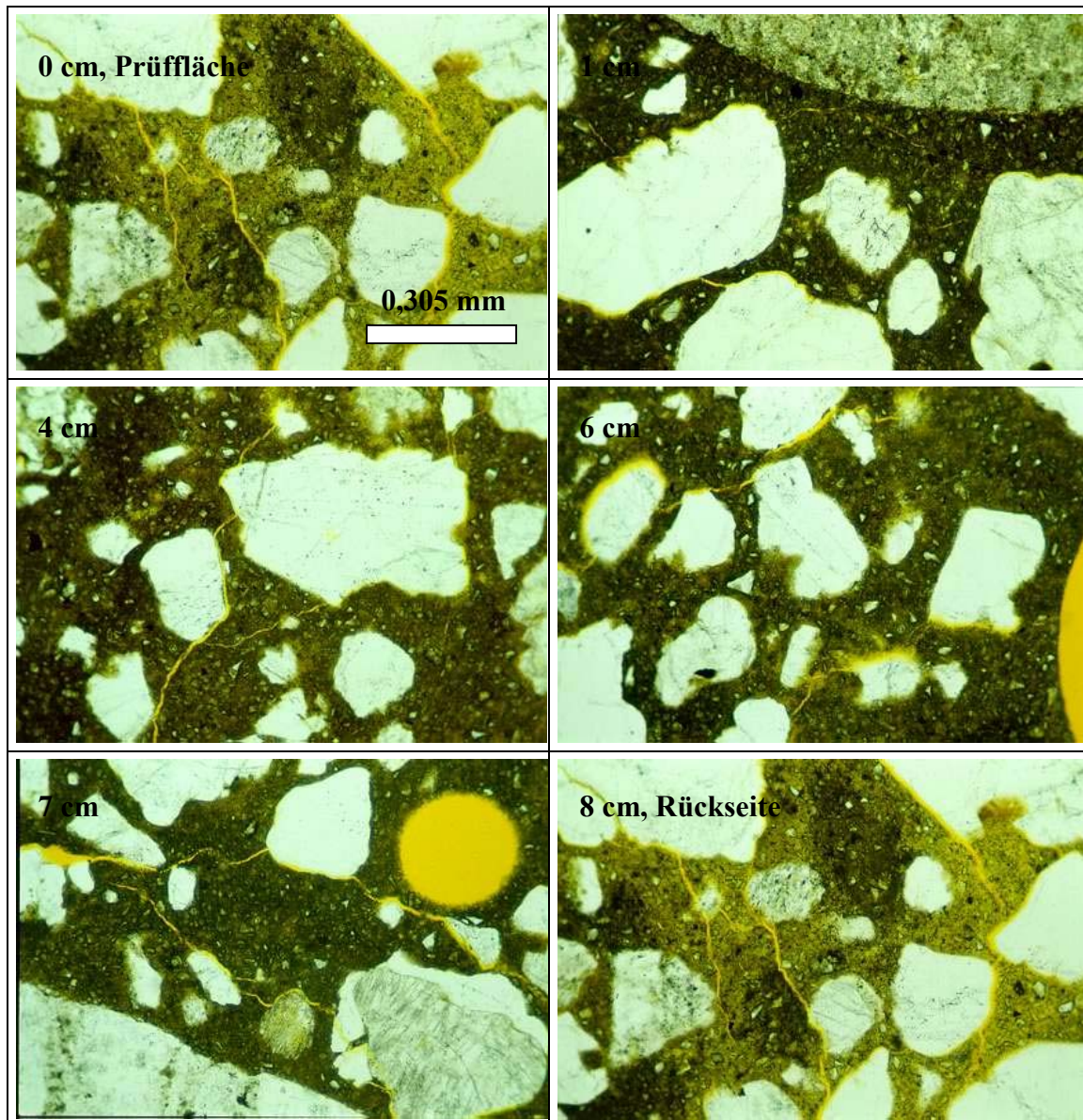


Bild 5.62: Darstellung des Schädigungsgradienten am Dünnschliff durch Ausschnittsvergrößerungen in unterschiedlichen Abständen von der Prüffläche des befestigten Probekörpers bei 10facher Vergrößerung, Versuchsserie **B\_34** (CEM III/A, w/z = 0,55; Nachbehandlung 34 Tage)

Es wurde versucht eine Rißweitenbestimmung in analogen Abständen zur Prüffläche, die für die Anfertigung der Dünnschliffaufnahmen, Bild 5.60 bis Bild 5.62, verwendet wurden, durchzuführen. Die Auflösung dieser Meßmethode liegt bei 10  $\mu\text{m}$ , so daß Rißweiten < 10  $\mu\text{m}$  nicht ausgewertet werden können. Somit ist die Einordnung der Rißweiten nur in abgestuften Bereichen von 10  $\mu\text{m}$  möglich. Die ermittelten Rißweiten liegen im Randbereich der Prüffläche sowie der Rückseite zwischen 20 bis 30  $\mu\text{m}$ . Rißweiten im Kernbereich der Probekörper wurden mit 10  $\mu\text{m}$  und kleiner ermittelt. Unabhängig von der Rißverteilung kann aufgrund der höheren Rißweiten im Randbereich der mit Ultraschall diagnostizierte Schädigungsgradient bestätigt werden [174].



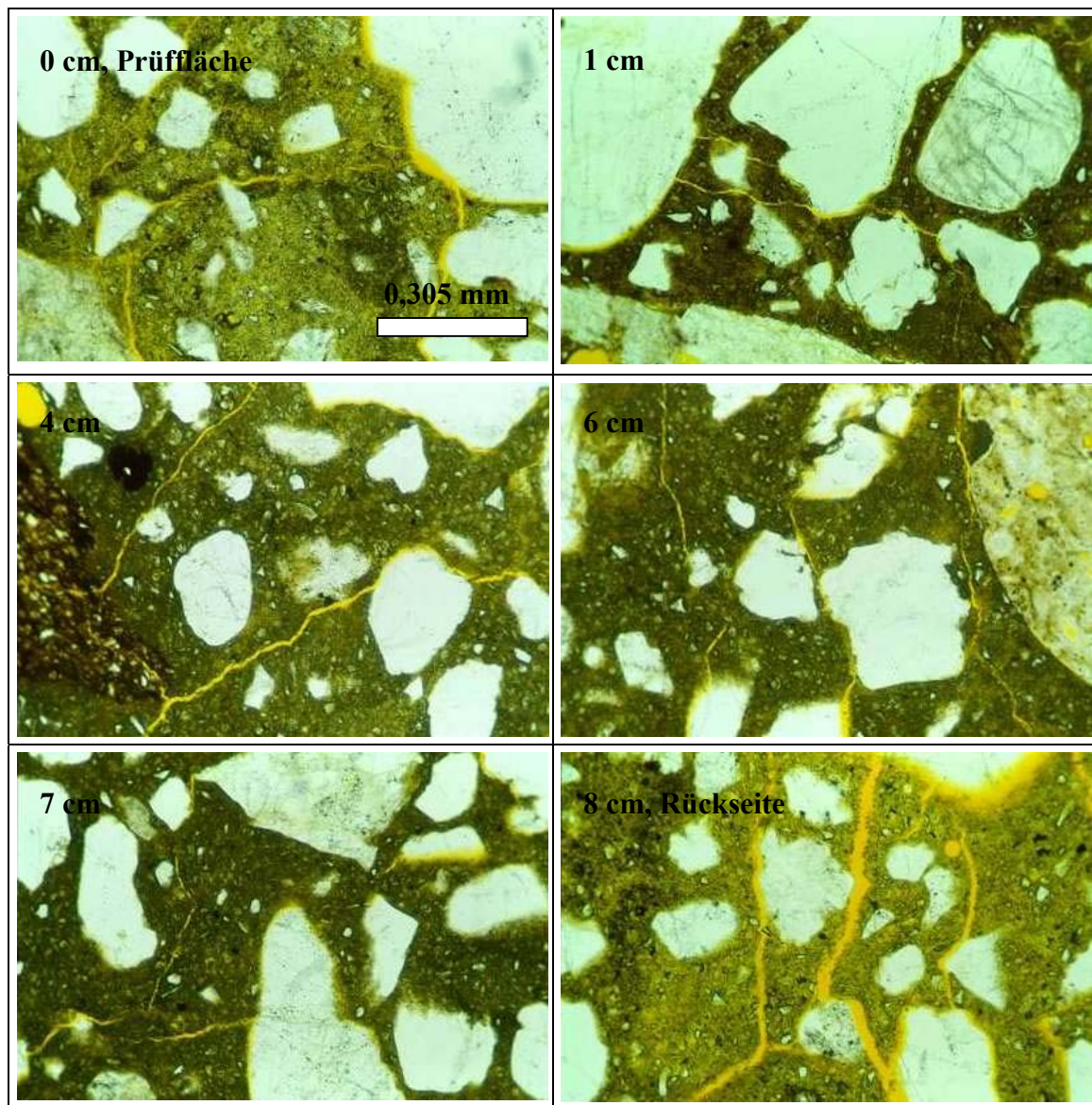


Bild 5.63: Darstellung des Schädigungsgradienten am Dünnschliff durch Ausschnittsvergrößerungen in unterschiedlichen Abständen von der Prüffläche des befrosten Probekörpers bei 10facher Vergrößerung, Versuchsserie S\_34 (CEM III/A, w/z = 0,6; Nachbehandlung 34 Tage)

## 5.2 Monitoring des Abbindeprozesses von Beton

Auf Versuche zur Beobachtung von Abbindeprozessen wird in der Literatur an vielen Stellen hingewiesen [z.B. 35, 38, 44, 71]. Zur Bewertung dieser dynamischen Prozesse werden Änderung der Impulslaufzeit, der Dämpfung der Erstamplitude und des Frequenzgehaltes herangezogen. Die von KÄSSNER et al. [92, 96] entwickelte rezepturgestützte Bewertung des Ultraschallsignals (Schichtenmodell) wird mit der Zielstellung durchgeführt, die Erhärtungsdruckfestigkeit (Frühfestigkeit) von Beton zu ermitteln (siehe Kapitel 2.1.3). Die nachfolgend dargestellten Untersuchungen wurden mit dem von der Firma GEOTRON hergestellten Ultraschallmeßsystem CONSONIC 60

[95] durchgeführt. In den ersten Untersuchungsschritten soll die errechnete Erhärtungsdruckfestigkeit  $\beta_{D(US)}$  unterschiedlicher Betone bewertet werden. Weiterhin ist vorgesehen, dieses Meßsystem im Rahmen der Durchführung von Homogenitätsuntersuchungen an Betonbauwerksteilen zu erproben, um zusätzlich zur gemessenen Impulslaufzeit, Festigkeitsänderungen (Relativmessungen) mit einzubeziehen.

### 5.2.1 Voruntersuchungen zu den elastischen Kennwerten der verwendeten Zuschläge

Aus Voruntersuchungen [175] war bekannt, daß die Schallgeschwindigkeit in den Zuschlägen nicht als konstanter Wert für  $v_L = 5000$  m/s betrachtet werden kann. Um den Einfluß der Zuschläge auf ein Minimum zu reduzieren, wurde eine Betonrezeptur entwickelt, die neben quarzitäen Sanden (0,1 bis 2,0 mm) nur eine Mineralart, Diabas als Splitt, für die Kornklassen 2/5, 5/8 und 8/16 mm enthält. Um die Schallgeschwindigkeit im verwendeten Diabas genau zu ermitteln, wurden an drei großen Gesteinsstücken, mit zwei parallel zugeschnittenen Flächen (Schallweg  $s \approx 15$  cm), über die Fläche verteilt 10 Messungen pro Gesteinsstück durchgeführt. Als Mittelwert für  $v_L$  wurde  $\bar{x} = 6336 \pm 35,9$  m/s ( $V_r = 0,57$  %) ermittelt. Die Schallgeschwindigkeit in reinem Quarz beträgt nach [176]  $v_L = 5740$  bis  $5760$  m/s. Die Analyse des Normsand nach DIN EN 196-1 [177] ergab einen  $\text{SiO}_2$ -Gehalt von 94,90 %. Dieser hohe Quarzanteil des Sandes führte zu einem angenäherten Wert von  $v_L = 5500$  m/s.

Die ermittelten Rohdichten  $\rho_k$  der Zuschläge sind Tabelle 5.15 zu entnehmen. Die  $\rho_k$ -Werte liegen im Bereich, der den Literaturangaben entspricht [47].

Tabelle 5.15: Rohdichten der verwendeten Zuschläge

Kornklasse	0,1 bis 0,5	0,5 bis 1,0	1,0 bis 2,0	2,0 bis 5,0	5,0 bis 8,0	8,0 bis 16,0
$\rho_k$ [kg/m <sup>3</sup> ]	2,58	2,61	2,60	2,81	2,81	2,81

### 5.2.2 Erhärtungsdruckfestigkeit von Beton

Zur Untersuchung der Erhärtungsdruckfestigkeit wurden Zemente mit unterschiedlichen Erhärtungsverlauf ausgewählt. Die Herstellung der Versuchsmischungen erfolgten mit einem CEM I und einem CEM III/A der Festigkeitsklasse 32,5 nach DIN 1164 [23].

#### ♦ Versuchsplanung

Der aufgestellte Versuchsplan ist Bild 5.65 zu entnehmen. Der Versuchsplan gliedert sich in zwei Untersuchungsschwerpunkte.

1. Durchführung von diskontinuierlichen Ultraschallmessungen an Normprismen, an denen nach unterschiedlichen Erhärtungszeiten  $\beta_{D(US, NP)}$  und  $\beta_{D(NP)}$  ermittelt wurde.
2. Durchführung von kontinuierlichen Ultraschallmessungen während der Hydratation von Beton mit einem Größtkorn von 8 und 16 mm bis zum 7. Tag. Zuschneiden von

3 Würfeln aus dem mit der Tauchsonde untersuchten Betonbalken. Vergleich der ermittelten Druckfestigkeit  $\beta_{Wm}$  mit  $\beta_{D(US, W)}$  am Versuchsende.

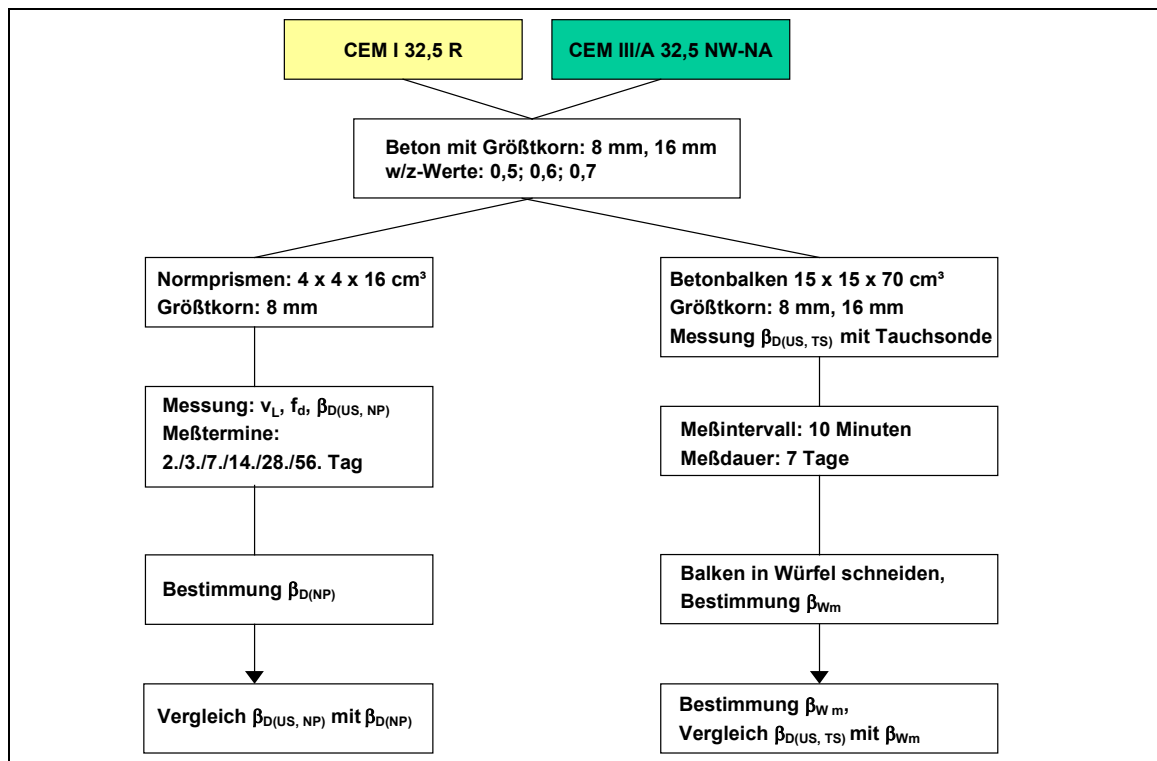


Bild 5.64: Versuchsplanung zur Untersuchung des Erhärtungsverlaufs mit dem CONSONIC 60

#### ♦ Versuchsdurchführung, verwendete Laborausrüstungen

Die Mischung des Frischbetons (Größtkorn 8 mm) zur Herstellung der Normprismen erfolgte in einem 15-Liter Ständerrührwerk der Firma TESTING. Die Präparation der Betonprismen erfolgte entsprechend der Rezepturangaben der Anlage 9.2, Tabelle 9.3. Zur Einstellung vergleichbarer Luftgehalte wurde eine gleichbleibende Konsistenz (KR) mit einem Ausbreitmaß von  $45 \pm 1$  cm eingestellt. Die Verdichtung (Vibrationstisch) der Gemische sowie die Druckfestigkeitsprüfung zu den jeweiligen Prüfterminen erfolgten nach DIN EN 196 T1 [177] mit Ausrüstungen der Firma TONI-TECHNIK. Die Normprismen wurden nach einem Tag ausgeschalt und bis zum Prüftermin unter Wasser gelagert. Zur Durchführung der diskontinuierlichen Bestimmung der Druckfestigkeit wurde das in LIGHTHOUSE 97 integrierte Festbetonmodul verwendet. Die Schallgeschwindigkeit wurde auf der Grundlage der DIN EN 13296, Entwurf 10/98 [113] ermittelt. Ausgewertet wurden pro Versuchsserie 3 Normprismen, deren  $\beta_{D(NP)}$ - und  $\beta_{D(US, NP)}$ - Werte gemittelt wurden.

Die Versuchsmischungen für die Herstellung der Betonbalken  $15 \times 15 \times 70 \text{ cm}^3$  (Tauchsondenmessung) wurden auf der Basis der Rezepturangaben der Anlage 9.2, Tabelle 9.4, nach DIN 1048, Teil 5 [6] hergestellt. Als Konsistenz wurde KF mit einem Ausbreitmaß von  $53 \pm 1$  cm eingestellt. Das Einsetzen der Tauchsonde erfolgte ent-

sprechend der Angaben im Kapitel 4.2.2. Nach einem Tag erfolgte das Ausschalen des Probekörpers mit anschließender Lagerung unter Wasser bis zum Ende der Ultraschallmessungen. Zur Erfassung der Erhärtungsdruckfestigkeit wurden die Rezeptureingaben (Bild 5.65, Bild 5.66) am CONSONIC unter Beachtung der Ergebnisse der Voruntersuchungen zum Zuschlag vorgenommen. Die Eingabe des Meßzeitraumes und des Meßintervalls sowie die Kalibrierung des Abstandes der Tauchabschnitte der Tauchsonde erfolgte entsprechend Bild 5.67 und Bild 5.68. Zur Steuerung der kontinuierlichen Bestimmung der Erhärtungsdruckfestigkeit wurde die Software LIGHTHOUSE 97 (Frischbetonmodul) verwendet. Gemessen wurde die Impulslaufzeit der P-Welle mit einem Meßintervall von 10 min in einem Zeitbereich von 7 Tagen. Mit einem in die Tauchsonde integrierten Temperatursensor erfolgte zu jedem Meßpunkt die Aufzeichnung der Isttemperatur. Der an der Tauchsonde eingestellte Schallweg betrug 160 mm.

Komponenten	Bezeichnung	Masse kg	Dichte kg/dm³	Volumen dm³
Zement	CEM3 32,5	318	2.99	106.4
Wasser	Wasser	175	1.00	175.0
Zusatzstoff 1		0.0	1.00	0.0
Zusatzstoff 2		0.0	1.00	0.0
Zusatzmittel 1		0.00	1.00	0.0
Zusatzmittel 2		0.00	1.00	0.0
Zusatzmittel 3		0.00	1.00	0.0
Frischbetonporen				18.0

Bild 5.65: Eingabemaske Bindemittel, Wasser

Zuschlag	Bezeichnung	Masse kg	Dichte kg/dm³	Volumen dm³	Vschall km/s
Körnung 1	14% S0,0,5	256	2.58	99.2	5.40
Körnung 2	8% S0,5/1	146	2.59	56.4	5.40
Körnung 3	9,5% S1/2	174	2.57	67.7	5.30
Körnung 4	14,5% K2/4	265	2.55	103.9	5.50
Körnung 5	22% K4/8	403	2.55	158.0	5.15
Körnung 6	32% K8/16	586	2.55	229.8	5.40

Schallgeschwindigkeit der Körnungen :  
☒ Einzelwerte ☐ Mittelwert 5.00 km/s

Bild 5.66: Eingabemaske Zuschläge

Zeitpunkt des Mischens :  
 Datum : 25.10.2001 dd.mm.jjjj Uhrzeit : 10:24 hh:mm  
 Kommentar :  
 Meßzeitraum / Intervalle :  
 Meßdauer : 168:22 h:min Intervalllänge : 0:10 h:min  
 Messungen : 1009

Bild 5.67: Eingabemaske zu den Zeitangaben

K	Auto	Länge mm	Status
1	<input checked="" type="checkbox"/>	150.1	OK
2	<input type="checkbox"/>		
3	<input type="checkbox"/>		
4	<input type="checkbox"/>		
5	<input type="checkbox"/>		
6	<input type="checkbox"/>		

Luftschall : 344.0 m/s Temperatur : 21.1 °C

Bild 5.68: Eingabemaske zur Bestimmung des Schallweges an der Tauchsonde

♦ *Bewertung der Versuchsergebnisse*

Die vom CONSONIC berechnete Erhärtungsdruckfestigkeit gilt für einen Würfel der Kantenlänge von 200 mm [95]. Tabelle 5.16 beinhaltet die ermittelten Werte für  $\beta_{D(NP)}$  und  $\beta_{D(US)}$  der untersuchten Normprismen aus Feinbeton. Grundsätzlich zeigt ein gedrungenener Probekörper aufgrund der Behinderung der Querdehnung eine höhere Druckfestigkeit an [79].

Tabelle 5.16: Vergleich  $\beta_{D(NP)}$  mit  $\beta_{D(US)}$

	CEM I 32,5 R				CEM III/A 32,5 NW-NA			
PK-Alter	$\beta_{D(NP)}$	$\beta_{D(US, NP)}$	Differenz	$E_D$	$\beta_{D(NP)}$	$\beta_{D(US, NP)}$	Differenz	$E_D$
[d]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[kN/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[kN/mm <sup>2</sup> ]
	w/z = 0,5							
2	29,1	26,6	-8,6	34,4	17,9	21,1	17,8	30,7
3	34,5	34,1	-1,2	36,3	22,7	26,0	14,5	33,0
7	42,2	37,9	-10,2	38,5	34,8	34,4	-1,1	36,1
14	48,4	41,2	-14,8	45,3	44,7	35,0	-21,7	41,9
28	56,9	45,4	-20,2	46,5	52,2	37,6	17,3	44,1
56	59,4	43,8	-26,3	47,7	61,8	37,1	25,1	46,4
	w/z = 0,6							
2	18,8	18,2	-3,2	30,4	12,6	15,2	20,6	28,3
3	22,5	22,1	-1,8	32,7	16,6	19,2	15,7	31,0
7	29,6	29,1	-1,7	36,1	24,7	25,4	2,8	34,2
14	34,0	32,1	-5,6	41,6	32,6	28,0	-14,1	40,5
28	39,7	35,3	-11,1	43,8	41,8	32,0	-23,4	42,9
56	43,0	32,8	-23,7	44,4	50,3	36,9	-26,6	45,8
	w/z = 0,7							
2	11,3	11,2	-0,9	25,3	8,2	8,9	8,5	23,1
3	15,0	15,1	0,7	28,8	10,7	12,8	19,6	26,7
7	20,8	19,7	-5,3	32,5	18,6	18,2	-2,1	30,5
14	25,4	25,0	-1,6	39,2	25,2	22,6	-10,3	37,3
28	27,9	26,9	-3,6	40,9	29,7	24,1	-18,8	39,9
56	31,7	27,1	-14,5	41,8	36,3	27,3	-24,8	41,8



Unter Einbeziehung von Bild 5.69 kann die Aussage getroffen werden, daß mit zunehmender Hydratationszeit und abnehmendem w/z-Wert die Differenz zwischen  $\beta_{D(NP)}$  und  $\beta_{D(US, NP)}$  größer wird. Der Koeffizient  $\beta_{D(US, NP)}/\beta_{D(NP)}$  ändert sich z.B. nach 28 Tagen Hydratationszeit bei den CEM I- Betonen von 0,8 (w/z = 0,5) auf 0,9 (w/z = 0,7) und bei den CEM III/A-Betonen von 0,72 (w/z = 0,5) auf 0,81 (w/z = 0,7).

Entscheidenden Einfluß auf die berechnete Druckfestigkeit  $\beta_{D(US, NP)}$  hat die Meßgenauigkeit. Nach DIN EN 13296 [113] muß die Erfassung der Impulslaufzeit mit einer Meßgenauigkeit von  $\pm 0,1 \mu s$  und der Schallweglänge des Probekörpers  $< 1 \%$  erfolgen. Wird z.B. eine Impulslaufzeit von  $37,0 \mu s$  ( $v_{L(NP)} = 4324 \text{ m/s}$ ) bei den Versuchsserien betrachtet, so entsteht durch eine Meßungenauigkeit von  $\pm 0,1 \mu s$  eine Änderung von  $\beta_{D(US, NP)} = \pm 0,3 \text{ N/mm}^2$  (bezogen auf CEM III/A, w/z = 0,7). Der gleiche Berechnungsansatz führt beim CEM I, w/z = 0,5 zu einer Änderung von  $\beta_{D(US, NP)} = 0,34 \text{ N/mm}^2$ . Meßungenauigkeiten bei der Bestimmung der Schallweglänge von  $\pm 1 \%$  ( $\pm 1,6 \text{ mm}$  beim NP) führen zu Änderungen von  $\beta_{D(US, NP)} = \pm 1,12 \text{ N/mm}^2$ . Schwankungen der Impulslaufzeit, die durch die Probenpräparation entstehen, liegen bei den untersuchten Probekörpern bei maximal  $1 \mu s$ , so daß dadurch Festigkeitsunterschiede von ca.  $3 \text{ N/mm}^2$  berechnet werden. Im Labor sind zur Eingrenzung des materialspezifischen Einflusses auf die Festigkeitsentwicklung höchste Anforderungen an die Meßwerterfassung zu stellen.

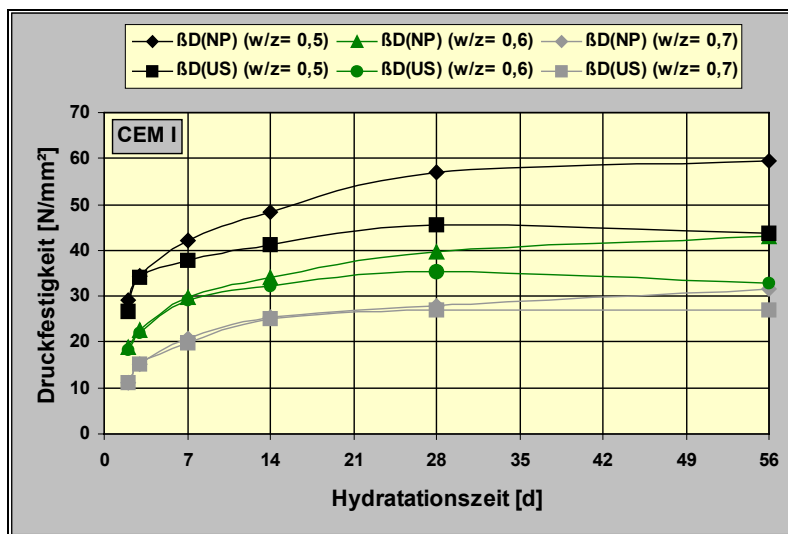


Bild 5.69: Vergleich von  $\beta_{D(NP)}$  und  $\beta_{D(US)}$  während einer Hydratationszeit von 56 Tagen

Die Korrelation zwischen dem dynamischen E-Modul  $E_D$  und der Prismendruckfestigkeit  $\beta_{D(NP)}$  der untersuchten Betone in Abhängigkeit von der Hydratationszeit ist Bild 5.70 zu entnehmen. In dem untersuchten Festigkeitsbereich steigt  $E_D$  mit zunehmender Druckfestigkeit  $\beta_{D(NP)}$  an. Die zeitliche Entwicklung von  $E_D$  verläuft jedoch schneller, als die von  $\beta_{D(NP)}$ . So erreichen die CEM I- Betone nach 7 Tagen ca. 75 % der Druckfestigkeit und 82 % des dynamischen E-Moduls des 28d-Wertes. Die Festigkeitsentwicklung der CEM III/A-Betone führt zu ca. 63 % der Druckfestigkeit

und ca. 78 % des dynamischen E-Moduls des 28d-Wertes. Nach [79] hat ein Beton, der mit einem Zement der Festigkeitsklasse 32,5 hergestellt wurde, nach 7 Tagen Erhärtung ca. 68 % der Festigkeit jedoch 80 % seines E-Moduls des 28d-Wertes.

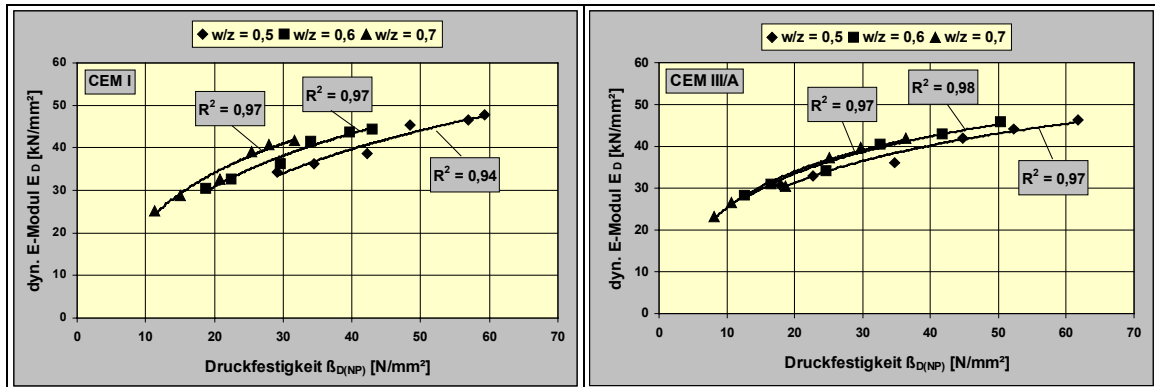


Bild 5.70: Korrelation zwischen dynamischen E-Modul  $E_D$  und Druckfestigkeit  $\beta_{D(NP)}$  nach Erhärtungszeiten von 2, 3, 7, 14, 28 und 56 Tagen

In zusätzlichen Versuchen wurde die Entwicklung der Würfel Druckfestigkeit  $\beta_{Wm}$  von Kiesbeton mit den Zementen CEM I 32,5 R, CEM III/A 32,5 NW-NA (Größtkorn 16 mm, w/z-Wert: 0,55; optimierter  $v_L$ -Wert für Zuschlag) und des dynamischen E-Moduls  $E_L$  in einem Versuchszeitraum von 1 Tag bis 360 Tage, untergliedert in die Prüftermine 1d, 3d, 7d, 14d, 28d, 56d, 90d und 360d untersucht, Bild 5.71. Die Berechnung des dynamischen E-Moduls  $E_L$  erfolgte auf der Basis der gemessenen Impulslaufzeit  $t_i$ , der Rohdichte und einer dynamischen Querdehnzahl von  $\mu_d = 0,24$  nach Gleichung (2.7).

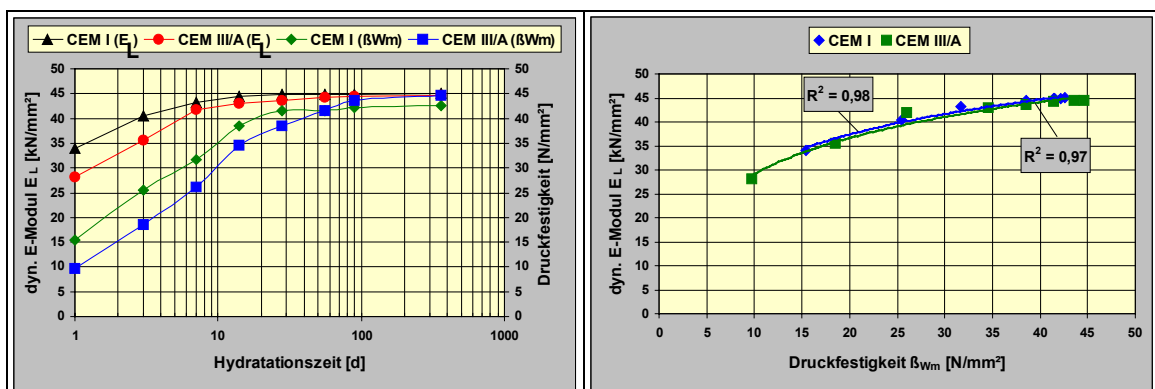


Bild 5.71: Entwicklung des dyn. E-Moduls und der Druckfestigkeit in Abhängigkeit vom Betonalter (links) und die Korrelation des dyn. E-Moduls mit der Druckfestigkeit (rechts)

Der schnellere Anstieg des dynamischen E-Moduls gegenüber der Druckfestigkeit ist Bild 5.72 und Bild 5.73 zu entnehmen. Dieser Sachverhalt ist für Bauwerksteile, die während der Ausbildung der Frühfestigkeit einer Zugbelastung (Schwindspannungen) ausgesetzt sind, als äußerst kritisch zu bewerten [46, 178]. Unter Einbeziehung der Tatsache, daß die dynamische Querdehnzahl  $\mu_d$  im Bereich der Frühfestigkeit größer ist und mit zunehmenden Betonalter kleiner wird [57, 33], ergibt sich für den Kurven-

verlauf des dynamischen E-Moduls im Bild 5.72 und Bild 5.73 eine geringe Korrektur. Unter Einbeziehung der ermittelten Änderung der Querdehnzahl  $\mu_d$  an den bereits genannten Mörtelprismen (siehe Kapitel 5.1.7), von 0,27 (3d-Wert) auf 0,21 (180d-Wert) würde der dynamische E-Modul, der an den Betonwürfeln ermittelt wurde, bis zum 14d-Wert um ca. 7 % niedriger und der 360d-Wert um ca. 2 % höher liegen. Zu vernachlässigen wäre in diesem Zusammenhang der Einfluß der Korngröße des Zuschlages auf die dynamische Querdehnzahl  $\mu_d$ . Die Lagerungsart, entsprechend den Angaben zum Bild 5.73, wurde nach DIN 1048, Teil 5 [6] durchgeführt.

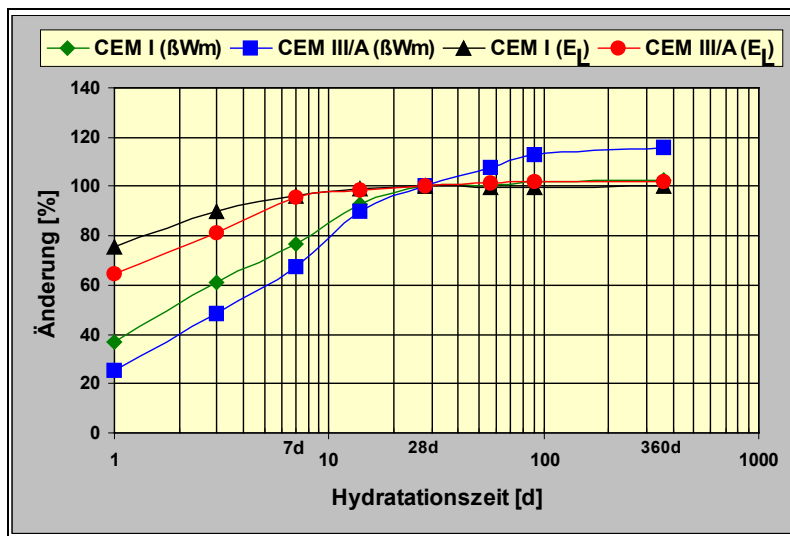


Bild 5.72: Änderung von  $\beta_{wm}$  und  $E_{dyn}$  in Abhängigkeit von der Hydrationszeit bei Anwendung der Lagerungsart: 1 Tag Form, 359 Tage Wasser

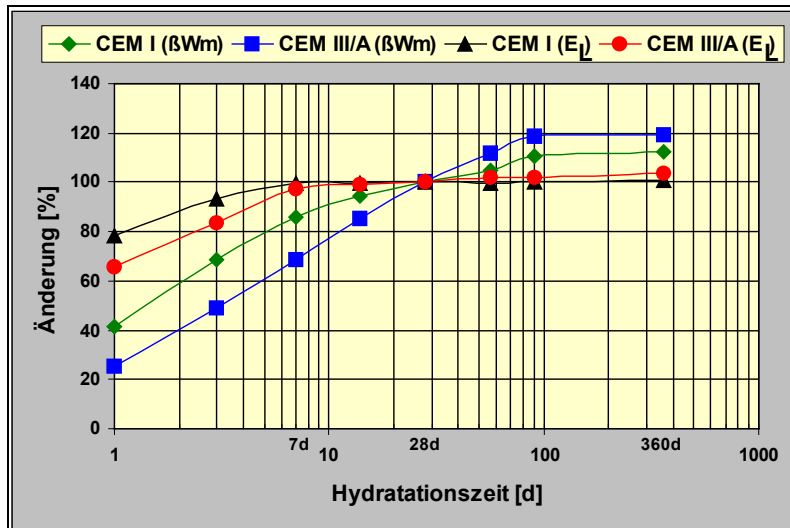


Bild 5.73: Änderung von  $\beta_{wm}$  und  $E_{dyn}$  in Abhängigkeit von der Hydrationszeit bei Anwendung der Lagerungsart: 1 Tag Form, 6 Tage Wasser und 353 Tage Normklima  $T = 20\text{ °C/r. F.} = 65\%$

Der Vergleich von  $\beta_{wm}$  und  $\beta_{D(US)}$  führt zu der Aussage, daß die zerstörende, wie die zerstörungsfreie Bestimmung der Druckfestigkeit tendenziell zur gleichen Aussage führt (Bild 5.74), jedoch die ermittelten Werte für  $\beta_{D(US, w)}$  generell höher liegen. Dieser



Sachverhalt würde Gleichung (2.18) entsprechen. Die ermittelten Differenzen sind Tabelle 5.17 zu entnehmen.

Tabelle 5.17: Vergleich der Druckfestigkeiten  $\beta_{Wm}$  und  $\beta_{D(US, W)}$  der untersuchten Betone

	CEM I 32,5 R				CEM III/A 32,5 NW-NA			
Prüftag	$\beta_{Wm}$	$\beta_{D(US, W)}$	Differenz	$v_L$	$\beta_{Wm}$	$\beta_{D(US, W)}$	Differenz	$v_L$
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[m/s]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[m/s]
1	15,4	16,8	8,8	4098	9,7	10,3	6,0	3760
3	25,4	30,4	19,7	4470	18,6	20,6	10,8	4201
7	31,7	38,2	20,4	4606	26,1	35,6	36,5	4539
14	38,5	43,0	11,0	4678	34,6	41,1	18,9	4626
28	41,5	45,2	8,2	4706	38,5	43,3	12,5	4659
56	41,6	45,8	5,8	4716	41,5	45,5	9,7	4689
90	42,2	46,7	3,1	4727	43,5	47,5	9,1	4714
360	42,6	47,3	3,4	4733	44,6	47,8	7,1	4719

Aus Tabelle 5.17 und Bild 5.75 ist ersichtlich, welche Änderungen von  $v_L$  und der berechneten Druckfestigkeit  $\beta_{D(US, W)}$  sich gegenüberstehen. Aussagen zu absoluten Druckfestigkeitswerten stellen somit sehr (zu) hohe Anforderungen an die Probenpräparation sowie die Meßwerterfassung, die über die gestellten Genauigkeitsanforderungen des Regelwerkes [113] hinausgehen.

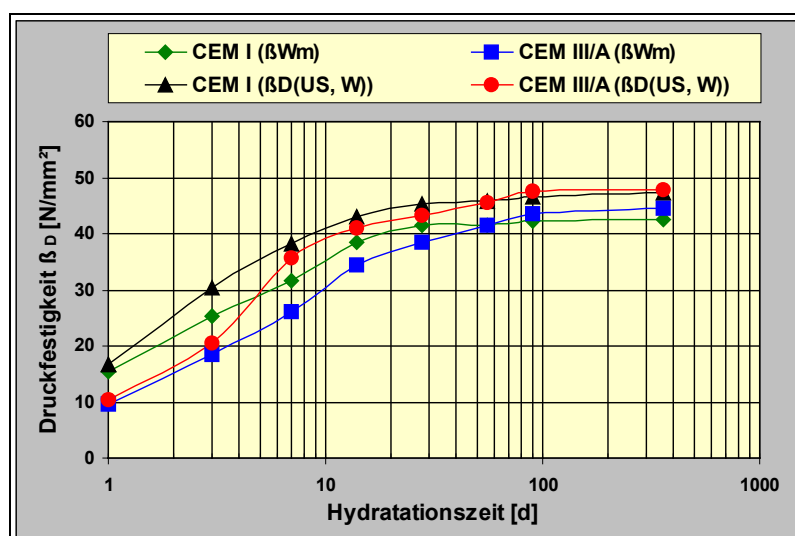


Bild 5.74: Vergleich von  $\beta_{D(US, W)}$  und  $\beta_{Wm}$  während einer Erhärtungszeit von 360 Tagen, Lagerungsart 1d Form, 359d Wasser

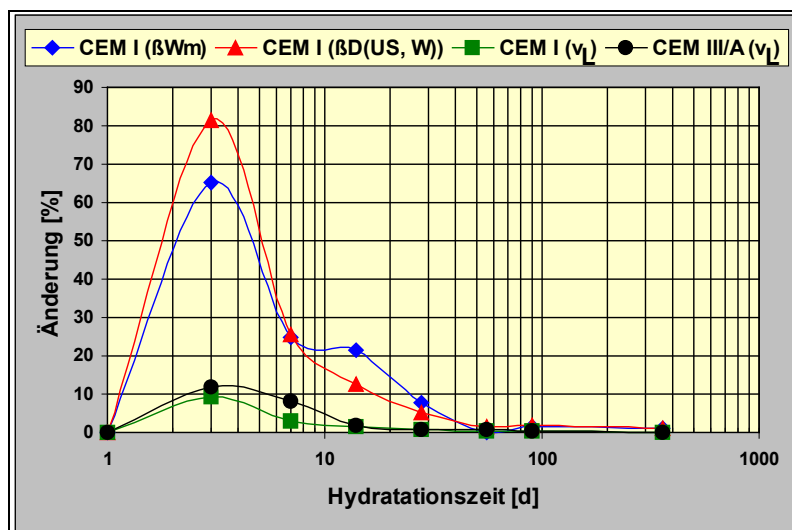


Bild 5.75: Änderung von  $\beta_{Wm}$ ,  $v_L$ , und  $\beta_{D(US)}$  während einer Erhärungszeit von 360 Tagen

Der eigentliche Ansatz zur Entwicklung des CONSONIC bezieht sich auf die Bestimmung der Frühfestigkeit von Beton mittels Tauchsondenmessung. Tabelle 5.18 enthält die Ergebnisse der Tauchsondenmessung der untersuchten CEM I- und CEM III/A-Betone. Bild 5.76 und Bild 5.77 verdeutlichen die Kurvenverläufe zu den berechneten Erhärungsdruckfestigkeiten (mit optimierten  $v_L$ -Werten für die Zuschläge) während einer Hydrationszeit von 7 Tagen. Am Ende der Meßzeit steht der Vergleich zwischen der berechneten Druckfestigkeit  $\beta_{D(US, TS) 7d}$  und der zerstörend ermittelten Druckfestigkeit  $\beta_{Wm}$  an den zugeschnittenen Betonwürfeln. Die Differenzbeträge zwischen  $\beta_{Wm 7d}$  und  $\beta_{D(US, TS) 7d}$  liegen beim Beton mit einem Größtkorn bis 8 mm, ausgenommen das Ergebnis der Versuchsserie C3\_07, deutlich  $< 10 \%$ . Alle Versuchsserien zeigen Differenzen  $< 20 \%$ . Der Einfluß der Zementart (Bild 5.78) und des w/z-Wertes (Bild 5.76, Bild 5.77) auf den Erhärungsverlauf werden durch das CONSONIC-Meßverfahren richtig wieder gegeben (Tabelle 5.18).

Tabelle 5.18: Vergleich  $\beta_{Wm 7d}$  mit  $\beta_{D(US) 7d}$  der Tauchsondenmessung

	C1: CEM I 32,5 R			C3: CEM III/A 32,5 NW-NA		
Serie_w/z-Wert	$\beta_{Wm 7d}$	$\beta_{D(US, TS) 7d}$	Differenz	$\beta_{Wm 7d}$	$\beta_{D(US, TS) 7d}$	Differenz
	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
Größtkorn 8 mm						
C1(C3)_0,5	36,5	36,0	-1,4	31,3	31,0	-1,0
C1(C3)_0,6	29,0	30,3	4,5	23,6	24,3	2,9
C1(C3)_0,7	21,5	24,1	12,1	17,0	18,3	7,6
Größtkorn 16 mm						
C1(C3)_0,6	28,9	32,9	13,8	22,3	26,7	19,7

Der Einfluß der höheren Schallgeschwindigkeiten im Zuschlag wird ebenfalls beim Vergleich der Versuchsserien C1(C3)\_0,6 zwischen dem Größtkorn von 8 mm und 16 mm sichtbar (Bild 2.20 [71]). Die Differenzen zwischen  $\beta_{D(US, TS) 7d}$  und  $\beta_{D(US, NP) 7d}$  (Größtkorn 8 mm) betragen, ausgenommen der Versuchsserie C1\_0,7 (18,3 %), < 10 % (Tabelle 5.16, Tabelle 5.18).

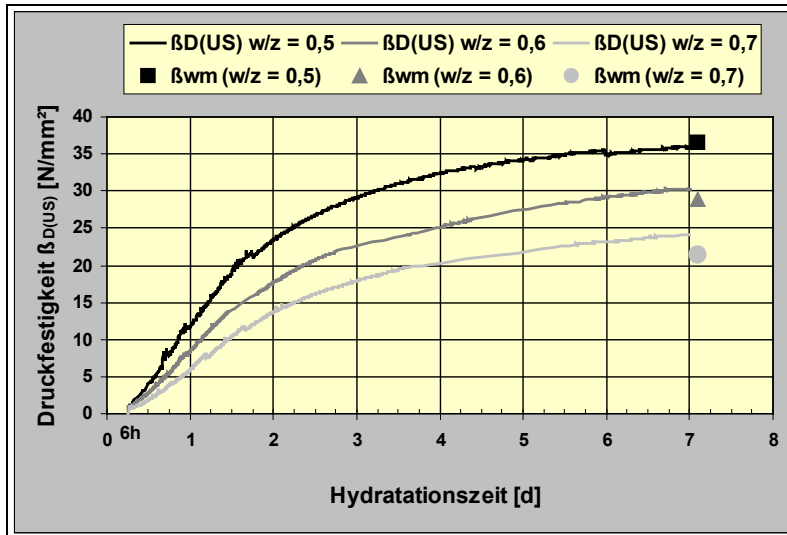


Bild 5.76: Entwicklung von  $\beta_{D(US)}$  während einer Hydratationszeit von 7 Tagen von CEM I- Betonen mit einem Größtkorn von 8 mm

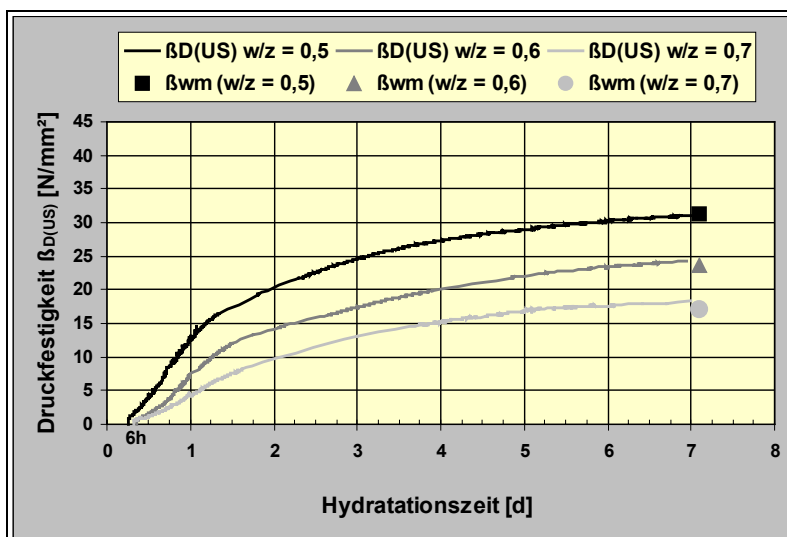


Bild 5.77: Entwicklung von  $\beta_{D(US)}$  während einer Hydratationszeit von 7 Tagen von CEM III/A- Betonen mit einem Größtkorn von 8 mm

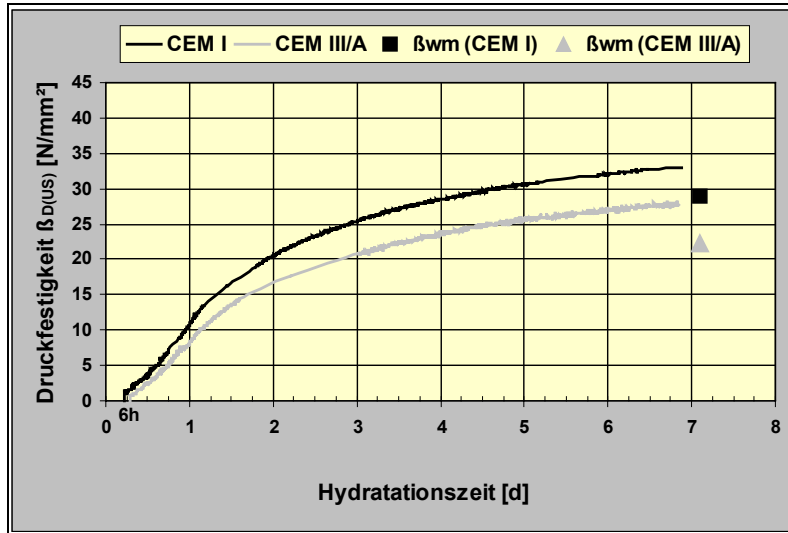


Bild 5.78: Vergleich der Entwicklung von  $\beta_{D(US)}$  während einer Hydrationszeit von 7 Tagen von CEM I- und CEM III/A- Betonen mit einem Größtkorn von 16 mm

Entsprechend den Angaben des Geräteherstellers ist die Abweichung von  $\beta_{D(US, TS)}$  gegenüber der wahren Druckfestigkeit  $< 20 \%$ , wenn  $\beta_{D(US, TS)}$  als Mittelwert aus 3 Meßwerten gebildet wird [95, 117]. Dieser hohe versuchstechnische Aufwand konnte jedoch zum Zeitpunkt der Auswertung der Versuchsergebnisse noch nicht realisiert werden.

### 5.2.3 Erhärtungsverlauf von Mörtel und Bindemitteln

Um das Hydrationsverhalten von schnell erhärtenden Mörteln und reinen Bindemitteln mit dem Ultraschallverfahren untersuchen zu können, wurde eine spezielle Meßvorrichtung (ZLB) mit integrierten Schallwandlern entwickelt (Bild 4.18) [142]. Die robuste Ausführung dieser Meßvorrichtung soll die Durchführung von Serienmessungen und das Mischen und Verdichten von Versuchsmischungen in der Meßvorrichtung ermöglichen. Diese Anforderung ist dann von besonderem Interesse, wenn die Wirkung von Beschleunigern auf das Erstarrungsverhalten untersucht werden soll. Die Anforderungen an die Homogenität der Mischung sind außerordentlich hoch, um die für die Auswertung der Schallgeschwindigkeit und der Höhe der Erstamplitude notwendige Signalqualität zu erreichen. Inhomogenitäten in der Mischung, bedingt durch die Art und Höhe der Dosierung der eingesetzten Zusatzmittel, können deshalb zu erheblichen Meßwertunterschieden führen. Die Entformbarkeit der erstarrten Probe wird durch einen abnehmbaren Gehäuseboden bzw. durch die leicht konische Form der Mörtelprobe gewährleistet. Die Länge der Durchschallungsachse beträgt 68 mm. Die verwendeten Schallwandler können entsprechend des aufgenommenen Frequenzspektrums (Bild 4.11) als breitbandig eingeordnet werden. Die Frequenzverteilung mit den dominierenden Frequenzen im Bereich von 90 bis 120 kHz erfüllt die Anforderungen für eine P-Wellenausbildung im zu untersuchenden Schallgeschwindigkeitsbereich. Zu optimieren ist noch die derzeit vorliegende konstruktive Lösung zum Einsetzen der Schallwandler in die Meßvorrichtung, die keine vollständige Abkoppelung der Schallwandler von der Gehäusewand der Meßvorrichtung ermöglicht.

Momentan wurde dieser Forderung Rechnung getragen, indem die Führung des Schallwandlers nicht im Bereich der größten seitlichen Abstrahlung vorgenommen wird. Zusätzlich sind zwischen Schallgebergewand und Gehäusewand der Meßvorrichtung konstruktiv mehrere Schallübergänge angeordnet, die den akustischen Widerstand stark erhöhen. In diesem Kapitel soll deshalb nur eine Aussage zur Reproduzierbarkeit der gemessenen Schallgeschwindigkeit der in einem separaten Mischbecher hergestellten Versuchsmischungen getroffen und erste Versuchsergebnisse zur Auswertung der Höhe der Erstamplitude der P-Welle in Abhängigkeit von der untersuchten Hydratationszeit vorgestellt werden.

In einer ersten Versuchsserie wurde Bindemittelleim aus CEM I 32,5 R mit einem w/z-Wert von 0,5 (wahrer w/z-Wert, ermittelt aus Absetzversuch: 0,458 [179]) in einem externen Mischbecher wiederholt hergestellt. Die Gesamtmischzeit untergliedert sich in 20 sec mit 300 U/min<sup>-1</sup> und 40 sec mit 1200 U/min<sup>-1</sup> unter Verwendung eines Laborrührgerätes der Firma KMF. Das Mischregime wurde den später durchzuführenden Versuchen zum Mischen in der Meßvorrichtung mit Beschleunigerzugabe und sofortiger Verdichtung angepaßt. Ausgewertet wurden 5 Versuchsmischungen gleicher Rezeptur, die in einem Zeitbereich von 24 h mit einem Meßintervall von 10 min gemessen wurden. Verglichen wurde die vom CONSONIC berechnete Schallgeschwindigkeit zu gleichen Meßzeitpunkten und der Variationskoeffizient, berechnet aus den 5 Einzelwerten. Im Ergebnis dessen erreicht der Variationskoeffizient unterschiedliche Maximalwerte während der Hydratationszeit von 24 h. Die automatische P-Wellenerkennung führt bei den Ultraschallmessungen mit ausreichend guter Signalqualität zu Variationskoeffizienten  $V_r < 2 \%$ . Als momentan kritisch ist die Auswertung der Impulslaufzeit zu Beginn der Hydratation bis zu einer Hydratationszeit von ca. 6 h zu bewerten. In diesem Zeitraum findet der Aufbau des Festkörperskeletts statt (Accelerationsperiode), der auch vom Erstarrungsbeginn ( $t_{EB}$ ) und Erstarrungsende ( $t_{EE}$ ) geprägt wird (Bestimmung von  $t_{EB}$  und  $t_{EE}$  nur durch Auswertung des Frequenzgehaltes möglich). Die an dem verwendeten CEM I 32,5 R ermittelte Erstarrungszeit nach DIN EN 196, Teil 3 [76], beträgt für  $t_{EB} = 3,16$  h und für  $t_{EE} = 4,33$  h und wurde im Bild 5.79 zur Information eingetragen. Die berechneten Variationskoeffizienten erreichen im Bereich 0 bis 4,5 h Hydratationszeit Maximalwerte von  $V_r < 3 \%$ , im Bereich von 4,5 bis 6 h Hydratationszeit, Maximalwerte von  $V_r < 7 \%$ . Im Zeitraum von 0 bis 4,5 h kann die automatische Signalaussteuerung und Laufzeiterkennung durch höher frequente Schwingungsanteile des Umwertschalls beeinflußt werden (falsch erkannte Amplituden des einsetzenden Umwertschalls werden als Schallgeschwindigkeit  $v_L < 900$  m/s ermittelt). Eine zusätzliche Erschwernis tritt durch Schwindprozesse in Abhängigkeit von der Zementart auf. Der untersuchte Zement CEM I 32,5 R verursachte im Zeitraum von ca. 4,5 bis 6 h einen höheren Rauschpegel im Signal. An dieser Stelle sind Überlegungen erforderlich, ob durch eine regelbare Nachstellung des Ankoppeldrucks während der Erstarrung eine Verbesserung der Signalqualität zur Ermittlung der weiteren Festigkeitsentwicklung erreicht werden kann, wodurch jedoch eine Bewertung der Erstamplitude eingeschränkt wird (Bild 5.79).

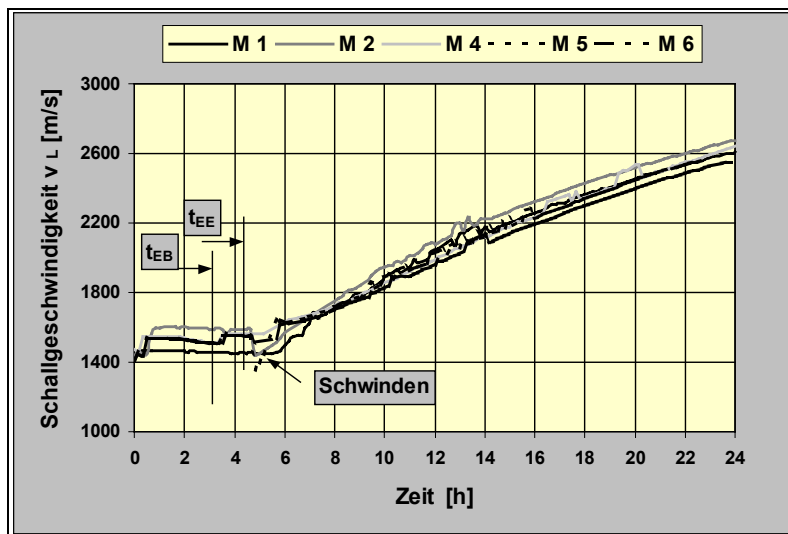


Bild 5.79: Verlauf der Schallgeschwindigkeit von 5 Zementleimmischungen CEM I 32,5 R während einer Hydratationszeit von 24 Stunden

Die ersten Versuchsergebnisse zur Auswertung der Höhe der Erstamplitude sind im Bild 5.80 dargestellt. Untersucht wurden 4 Mörtelrezepturen (CEM I 42,5 R, Normsand,  $w/z = 0,5$ ) mit der im Bild 5.80 angegebenen Beschleunigerdosierung, die in der Meßvorrichtung gemischt werden mußten und sofort nach Beendigung des Mischvorganges auf einem neben dem Ultraschallmeßgerät stehenden Vibrationstisch 15 s verdichtet wurden. Die Kurvenverläufe zeigen den Einfluß der Dosierung des Beschleunigers durch einen früheren und zugleich steileren Anstieg der Amplitude an. Die Auswertung der Erstamplitude bietet gegenüber der Erfassung der Impulslaufzeit den Vorteil, daß eine empfindlichere Bewertung der ablaufenden stofflichen Prozesse möglich ist.

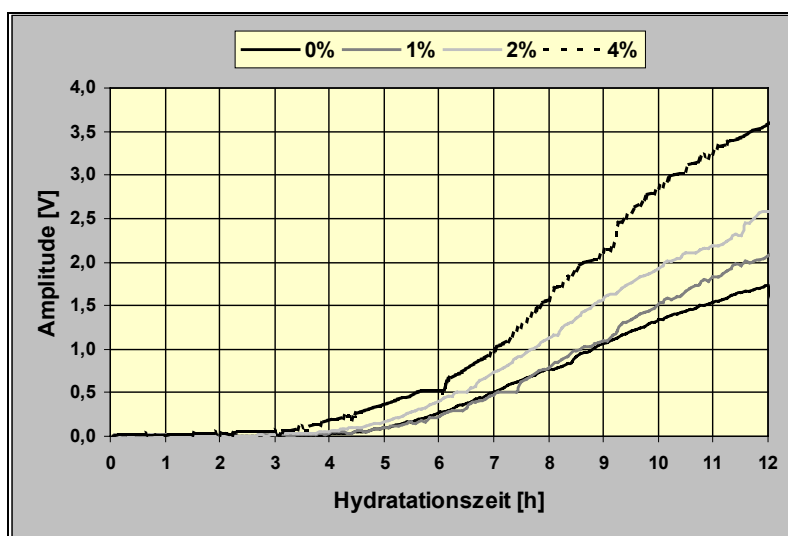


Bild 5.80: Änderung der Höhe der Erstamplitude bei einer Beschleunigerdosierung von 1, 2 und 4 % während einer Hydratationszeit von 12 h

## 5.3 Bauwerksdiagnose

### 5.3.1 Berührungslose Erfassung von Baustoffkennwerten

Um die erforderliche, hohe Meßpunktdichte für die Durchführung von tomographischen Untersuchungen unter Anwendung von Ultraschallwellen zu erreichen, wurden durch die Arbeiten im Teilprojekt B1 des Sonderforschungsbereiches 524 die verfahrenstechnischen Grundlagen für ein berührungslos arbeitendes Ultraschallverfahren aufgebaut. Diese beinhalten, daß auf der Basis der ermittelten Strahlparameter (Kapitel 4.6.2) eine laserinduzierte Schallanregung mit einem Festkörperlaser der Bauart Neodym-YAG an Beton durchgeführt wird und der Empfang dieser Schallwellen mit einem Laservibrometer (Kapitel 4.7) ebenfalls berührungslos erfolgen kann. Der entscheidende Erfolg konnte diesbezüglich mit dem im Bild 5.81 dargestellten Versuchsaufbau erzielt werden. Angeregt wurden aus einer Entfernung von ca. 2 m Schallwellen in einem Betonwürfel der Kantenlänge von 10 cm, die mit dem Laservibrometer PSV 300 F ebenfalls aus einer Entfernung von ca. 2 m aufgezeichnet wurden. Das Frequenzspektrum der aufgezeichneten Schallwelle (Bild 5.82) kann als breitbandig mit Maxima im Frequenzbereich von 100 bis 300 kHz bewertet werden. Damit ist der Frequenzgehalt unter den genannten Versuchsbedingungen im Bereich von 200 bis 300 kHz deutlich höher als bei der Anregung und dem Empfang von Schallwellen mit herkömmlichen Piezowandlern unter Anwendung der mechanischen Ankopplung und Ankoppelmitteln (auswertbare Frequenzen bis ca. 100 kHz). Der Frequenzgehalt konnte in dem genannten Bereich durch Verwendung hochfrequenter Piezoschallgeber (500 kHz) bei Anwendung der mechanischen Ankopplung (Ton) am gleichen Meßobjekt nicht erreicht werden. Durch den Wegfall der mechanischen Ankopplung und der Beeinflußbarkeit des angeregten Frequenzspektrums durch die Energiedichte und die Impulsdauer des Anregungslasers stehen kleinere Wellenlängen zur Bewertung von Gefügeveränderungen zur Verfügung. In weiteren Entwicklungsschritten sollen durch eine zentrale Systemsteuerung beide Laser (Anregung/Empfang) so geführt werden, daß ein Scannen einer definierten Untersuchungsfläche eines Bauwerksteils erfolgen kann [150, 180].

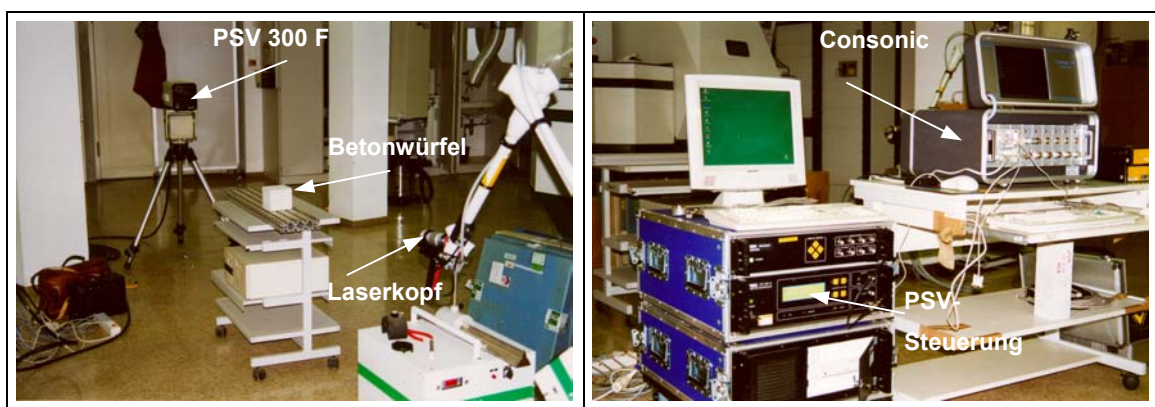


Bild 5.81: Berührungslose Ultraschallmessung (links), Systemsteuerung (rechts)



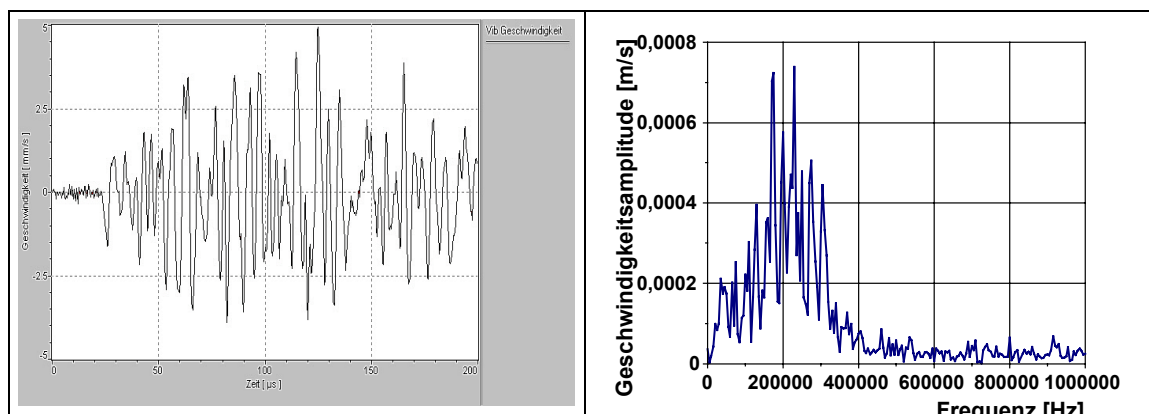


Bild 5.82: Ultraschallsignal der laserinduzierten Schallanregung (links), Frequenzspektrum (rechts)

### 5.3.2 Homogenitätsuntersuchungen an Bauwerksteilen

Homogenitätsuntersuchungen an Bauwerksteilen werden mit der Zielstellung durchgeführt, die Verteilung von Materialkennwerten ( $v_L$ ;  $E_{\text{dyn}}$ ;  $\beta_{D(\text{US})}$ ) in einer bestimmten Untersuchungsfläche zu erfassen und grafisch darzustellen. Die Aufgabenstellungen resultieren zum einen aus der Aufklärung von Schadensfällen [181, 182] und zum anderen aus der Notwendigkeit, für geplante Umnutzungen bzw. Nutzungserweiterungen die Materialeigenschaften in dem Umfang zu ermitteln, wie es zum Erreichen der erforderlichen Planungssicherheit zur Durchführung von konstruktiven Maßnahmen notwendig ist [183, 130].



Bild 5.83: Untersuchte Betonteile eines Stützenkopfes, Kopfstück (links), Unterbau (rechts)

Die Untersuchung der im Bild 5.83 dargestellten Betonteile eines Stützenkopfes einer Brücke wurden mit der Zielstellung durchgeführt, Aussagen zur Homogenität des Betons in ausgewählten Untersuchungsbereichen zu treffen und Festigkeitsunterschiede zu detektieren, die im begrenztem Ausmaß durch eingeschleppte Fremdstoffe in den Frischbeton entstanden waren. Dazu sollte das Ultraschallverfahren mit der Anordnung der Schallwandler für die Ausführung der direkten Durchschallung angewendet werden. Als Schallwandlersystem wurde die Prüfkopfkombination UNG 20/SW 20 der Firma



GEOTRON gewählt. Zur Signalerzeugung und –auswertung stand das Ultraschallmeßsystem CONSONIC 60 zur Verfügung, so daß in die Auswertung der Impulslaufzeit die Druckfestigkeit  $\beta_{D(US)}$  als Relativwert pro Meßpunkt mit einbezogen werden konnte. Die ausgewählten Untersuchungsflächen wurden in ein Meßraster von 10 cm untergliedert. Als Ankoppelmittel wurde Ton verwendet. Der genauen Bestimmung der Schallwegstrecken wurde besondere Bedeutung beigemessen, um durch die gemessenen Impulslaufzeiten und berechneten Druckfestigkeiten  $\beta_{D(US)}$  die erforderliche Differenzierung in der Verteilung der Materialkennwerte zu erhalten. Der Schallweg konnte beim Betonteil „Kopfstück“ mit einer Toleranz von  $\pm 10$  mm und beim Betonteil „Unterbau“ mit einer Toleranz von  $\pm 15$  mm bestimmt werden. Tabelle 5.19 vermittelt einen Überblick zu den erzielten Meßergebnissen.

Tabelle 5.19: Übersicht der ermittelten Materialkennwerte

	$v_{L \max}$	$v_{L \min}$	$v_L \bar{x}$	$s(v_L)$	$V_r(v_L)$	$\beta_{D(US) \max}$	$\beta_{D(US) \min}$	$\beta_{D(US)} \bar{x}$	$s(\beta_{D(US)})$	$V_r(\beta_{D(US)})$
	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[%]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[%]
Kopfstück	4487	4323	4388 <sup>22</sup>	38,5	0,9	44	33	37	2,5	6,8
Unterbau	4360	4111	4247 <sup>23</sup>	43	1,0	36	23	30	2,4	8,0

Unter Beachtung der Meßungenauigkeiten bezüglich der Ermittlung der Impulslaufzeit von  $\pm 3 \mu s$  ( $1 \mu s \hat{=} 0,5 \text{ N/mm}^2$ ) und der Schallwegstrecken ( $1 \text{ cm} \hat{=} 1,2 \text{ N/mm}^2$ ) zeichnen sich die Unterschiede zwischen den Untersuchungsbereichen Betonteil „Kopfstück“ und „Unterbau“ deutlich ab. Betonteil „Kopfstück“ kann als homogen eingestuft werden, die Schallgeschwindigkeiten liegen in einem typischen Bereich für einen als B 35 projizierten Beton, die Streuung der Meßwerte ist sehr gering, Bild 5.84, Tabelle 5.19. Durch die berechneten Druckfestigkeiten werden die geringen Unterschiede der Schallgeschwindigkeit verstärkt, Bild 5.85. Der Vergleich mit dem Untersuchungsbereich Betonteil „Unterbau“ führt zu der Aussage, daß großflächige und punktuelle Unterschiede zwischen den Untersuchungsbereichen auftreten, Bild 5.86, die zur Berechnung deutlich niedrigerer Druckfestigkeiten in analogen Bereichen führen, Bild 5.87.

Die Anwendung der diskontinuierlichen Druckfestigkeitsberechnung  $\beta_{D(US)}$  war in dem konkreten Anwendungsfall mit einem erheblichen Informationsgewinn verbunden.

<sup>22</sup> durchschnittliche Impulslaufzeiten von 630  $\mu s$  bei Schallwegen von 2800 mm

<sup>23</sup> durchschnittliche Impulslaufzeiten von 350  $\mu s$  bei Schallwegen von 1400 mm

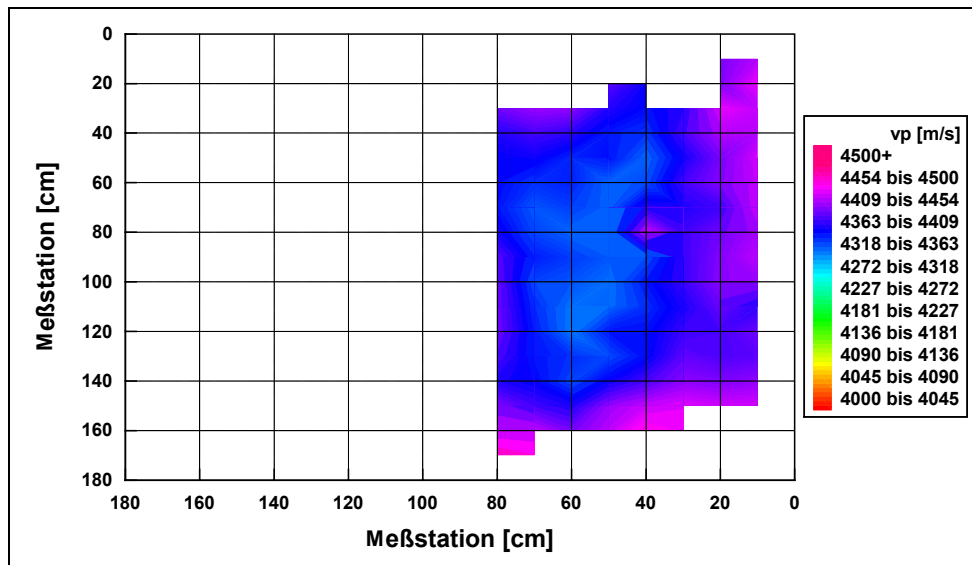


Bild 5.84: Verteilung von  $v_p$  in der Untersuchungsfläche: Kopfstück

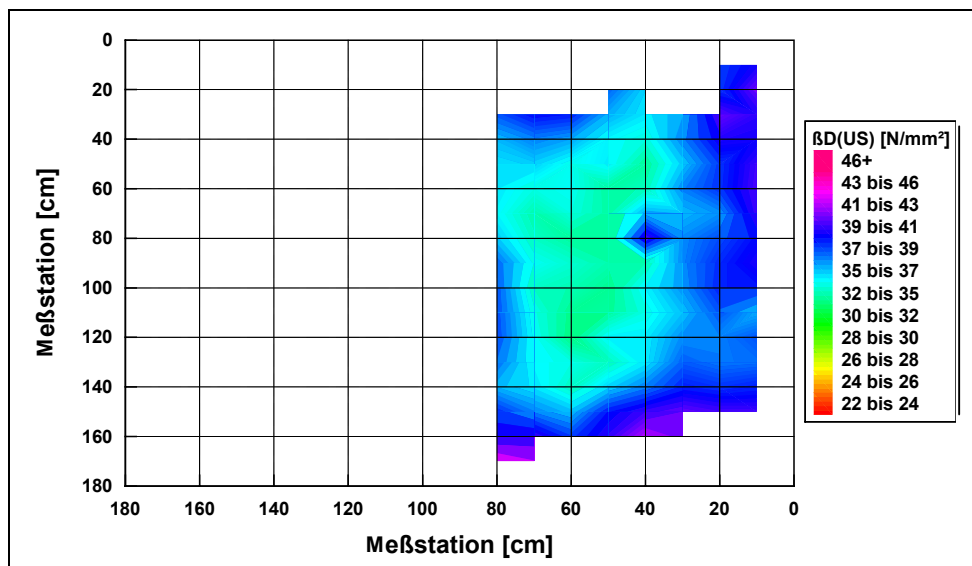
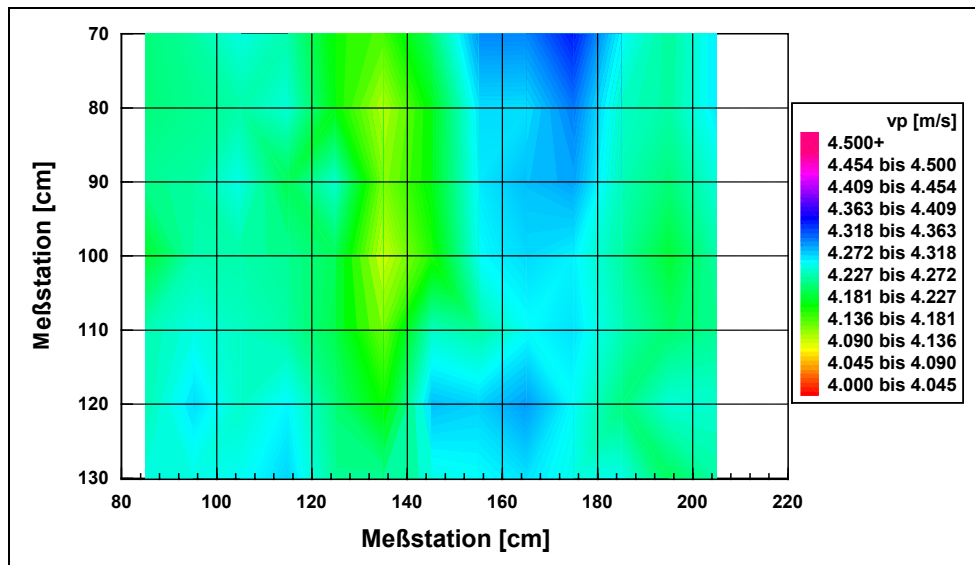
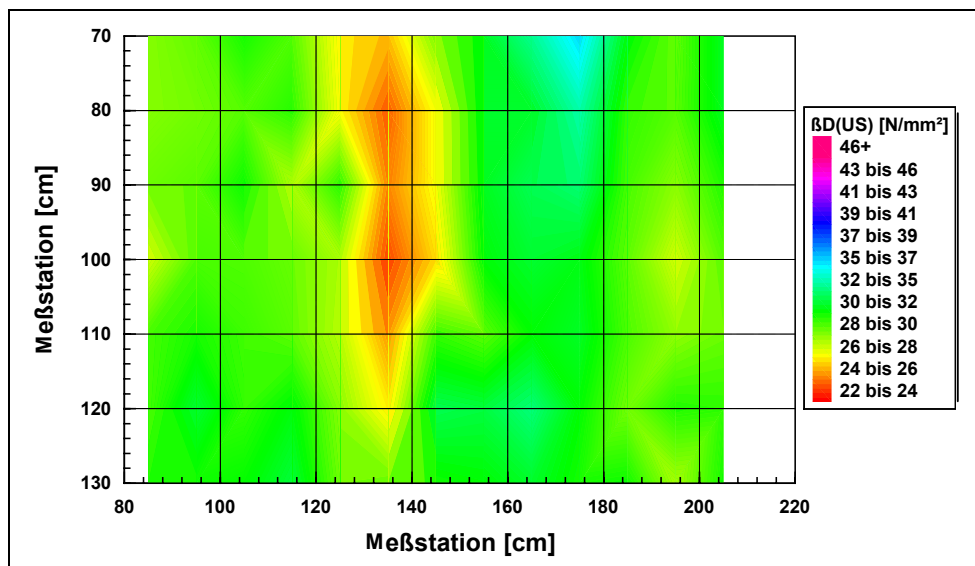


Bild 5.85: Verteilung von  $\beta_{D(US)}$  in der Untersuchungsfläche: Kopfstück

Bild 5.86: Verteilung von  $v_p$  in der Untersuchungsfläche: UnterbauBild 5.87: Verteilung von  $\beta_{D(US)}$  in der Untersuchungsfläche: Unterbau

## 6 Zusammenfassung

### Thema der Arbeit:

*„Erfassung von Gefügeveränderungen in Beton durch Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren zur Einschätzung der Dauerhaftigkeit“*

### Zielstellung der Arbeit:

Die Arbeit gliedert sich in folgende Komplexe, die als gemeinsame Basis die Anwendung von akustischen Prüfverfahren zur Erfassung von Gefügeveränderungen im Beton haben:

Komplex I: Voruntersuchungen zum Ultraschallverfahren mit mechanischer Ankopplung, Grundlagenuntersuchungen zur laserinduzierten Anregung und der berührungslosen Erfassung von Schallwellen in der Meßmethodik der Durchschallung.

Komplex II: Erfassung von Gefügeschädigungen infolge Frostangriff, mit dem Schwerpunkt der Visualisierung des Schädigungsgradienten.

Komplex III: Untersuchung des Hydratationsverlaufes von Zementleim, Mörtel und Beton, Berechnung der Erhärtungsdruckfestigkeit von Mörtel und Beton unter Einbeziehung der Rezeptur.

### Ergebnisse:

Der **erste** Komplex umfaßt Voruntersuchungen zum Ultraschallmeßsystem auf der Basis der mechanischen Ankopplung hinsichtlich Sendefrequenzen, Ankoppeldruck und gerätespezifischen Verzögerungszeiten. Zur schrittweisen Entwicklung eines berührungslos arbeitenden Ultraschallverfahrens wurden Grundlagenuntersuchungen zur laserinduzierten Anregung von Ultraschallwellen und zur berührungslosen Signalerfassung mittels Laservibrometer durchgeführt. Im Ergebnis dieser Voruntersuchungen wird die Erprobung des Ultraschallverfahrens als rein optisches Meßverfahren im Labor durchgeführt. Im Hinblick auf später durchzuführende tomographische Untersuchungen an Laborprobekörpern und Bauwerksteilen steht die Erfassung der Verteilung von Gefügeeigenschaften einer definierten Fläche und Tiefe (z.B. Schädigungsgradient) im Vordergrund. Diese Arbeiten wurden im Rahmen des Teilprojektes B1 des SFB 524 an der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt. Aus den Ergebnissen der Voruntersuchungen konnten konkrete Meßbedingungen für die Durchführung der experimentellen Arbeiten abgeleitet werden:

1. Die Erfassung der charakteristischen Sendefrequenzen der verwendeten Schallgeber erfolgte mit dem Laser-Scanning-Vibrometer, um unbeeinflußt von der Charakteri-

stik eines konventionellen Schwingungsaufnehmers die Sendefrequenzen als Geschwindigkeits- oder Wegamplitude darzustellen. Die Erkenntnisse zu den Sendefrequenzen wurden verwendet, um Berechnungen zu den erreichbaren Wellenlängen des Ultraschallsignals und zur angeregten Wellenart durchzuführen.

2. Ab einem Ankoppeldruck von  $> 800$  mbar ( $0,08 \text{ N/mm}^2$ ) kann die Impulslaufzeit unabhängig vom Ankoppeldruck gemessen werden. Der Einfluß des Ankoppeldrucks auf die Höhe der Erstamplitude (Dämpfung) bleibt in dem für die technische Versuchsdurchführung realisierbaren Druckbereich bis 1400 mbar bestehen. Der Zusammenhang zwischen Ankoppeldruck und Amplitude kann durch eine lineare Funktion beschrieben werden. Änderungen des Ankoppeldrucks von 20 mbar führen in einem Druckbereich von 400 bis 1400 mbar zu einer Amplitudenänderung von 3,5 %.
3. Um zu untersuchen, ob die Verzögerungszeit des breitbandigen Schallwandlersystems UPG-D/UPE-D (für Dehnwellenresonanzmessung) von der Probekörperlänge abhängig ist, wurde die Bestimmung der Verzögerungszeit in Abhängigkeit unterschiedlicher Schallwege im Beton durch Einbeziehung von Bohrkernlängen von 25 bis 300 mm vorgenommen. Aus der linearen Funktion zwischen Impulslaufzeit und Schallweg (Bohrkernlänge) wurde eine Verzögerungszeit von  $1,4 \mu\text{s}$  ermittelt.
4. Die erforderliche Meßpunktdichte und Meßgeschwindigkeit zur Durchführung von tomographischen Untersuchungen ist nur durch Einsatz eines berührungslos arbeitenden Ultraschallverfahrens realisierbar. Dazu ist der Einsatz von Lasertechniken erforderlich.
5. Zur laserinduzierten Anregung von Ultraschallwellen wurde ein Nd: YAG-Laser mit der Grundwellenlänge von 1064 nm verwendet. Die erforderliche Laserenergie liegt im Bereich von 0,2 bis 1,0 J. Die mittlere Impulsleistungsdichte zur Schwingungsanregung beträgt 100 bis 300 MW/cm<sup>2</sup>.
6. Die laserinduzierte Schallanregung konnte an unterschiedlichen Baustoffen, wie Beton, Porenleichtbeton, Ziegel und Marmor reproduzierbar nachgewiesen werden. Sie wird beeinflusst durch die Laserstrahlparameter Wellenlänge, Energiedichte, Pulsdauer und Pulswiederholfrequenz.
7. Die Anregbarkeit der Transversalwelle (S-Welle) durch einen Laserstrahl mit definierter Energiedichte eröffnet erstmalig die Möglichkeit, die Berechnung des dynamischen E-Moduls mit der für Baustellenmessungen erforderlichen Datendichte durch Einbeziehung der dynamischen Querdehnzahl zu präzisieren.
8. Der Empfang von Ultraschallwellen wurde durch den Einsatz eines Laser-Scanning-Vibrometers realisiert. Es können Schwingungen von Bauwerksteiloberflächen als Frequenz- und Zeitsignale durch Abtasten (Scannen) einer Untersuchungsfläche mit variablen Meßpunktabständen erfaßt werden. Je nach Reflexionseigenschaften der Betonoberfläche können Bauwerksteildicken bis 0,5 m ausgewertet werden.

9. Die Steuerung des Laservibrometers erfolgt zur Gewährleistung von tomographischen Untersuchungen über zwei Triggerfunktionen (Zeitmessung, Laserposition). Zusätzlich zur Impulslaufzeit kann die Höhe der Erstampplitude (Dämpfung) ausgewertet werden.
10. Die Funktion eines rein optischen Ultraschallmeßsystems wurde für Anregung und Empfang von Schallwellen aus Entfernungen von ca. 2 m an einem Betonwürfel der Kantenlänge von 10 cm im Labor nachgewiesen. Der Frequenzgehalt der Schallwelle im Bereich höherer Frequenzen (200 bis 300 kHz) eröffnet die Möglichkeit, Gefügeuntersuchungen mit einer höheren Auflösung (kleineren Wellenlängen) im Vergleich zur traditionellen Ultraschallmessung mit mechanischer Ankopplung vorzunehmen.

Der **zweite** Komplex beinhaltet die Untersuchung von Gefügeschädigungen, die während der Prüfung des Frostwiderstandes durch Anwendung des CF-Testes erzeugt wurden. Für die Betonherstellung der Probekörper wurden ein Portlandzement (CEM I) und ein Hochofenzement (CEM III/A) der Festigkeitsklasse 32,5 verwendet, der w/z-Wert im Bereich von 0,45 bis 0,7 variiert, Zusatzmittel eingesetzt und zur standardmäßig angewendeten Nachbehandlungsdauer von 6 Tagen eine verlängerte Wasserlagerung von 34 Tagen bei den CEM III/A- Betonen erprobt.

Als Kennwerte der Dauerhaftigkeit wurden die Druckfestigkeit  $\beta_{wm}$  (nur Ausgangswert), Wasseraufnahme, die äußere Schädigung (Abwitterung) und die innere Schädigung des Betongefüges während der FTW-Prüfung ermittelt. Zur Beurteilung der inneren Schädigung wurden die Änderung der mechanischen Kennwerte ( $\beta_{BZ}$ ) vor und nach Frostangriff und der elastischen Kennwerte (dynamischer E-Modul berechnet nach dem Dehnwellenresonanzverfahren  $E_D$ , aus der Eigenschwingzeit der Biegewelle  $E_B$ , der Impulslaufzeit  $E_{rel}$ ; dynamische Querdehnzahl  $\mu_d$ ; Q-Faktor) während der Prüfung des Frostwiderstandes ausgewertet. In die Berechnung von  $E_D$  wurde die dynamische Querdehnzahl  $\mu_d$  mit einbezogen. Die Auswertung der Impulslaufzeit in Verbindung mit der Betonrezeptur führte zur Berechnung des Festigkeitsabfalls ( $\beta_{D(US)}$ ) während des Frostangriffs. Der Schädigungsgradient wurde ausgehend von der Prüffläche (Frostangriff) mit einem Abstand der Durchschallungsachsen von 5 mm parallel zur Prüffläche über die gesamte Probekörperhöhe gemessen.

Folgende Kriterien zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit wurden ermittelt:

11. Die gefügeverdichtende Wirkung der verlängerten Nachbehandlung führt bei den CEM III/A- Betonen (ohne LP) bei allen w/z-Werten zu einer Reduzierung der Wasseraufnahme um ca. 30 %, der Abwitterung bei hohen w/z-Werten (0,6; 0,7) um ca. 70 % und des dynamischen E-Moduls bei den niedrigen w/z-Werten (0,45; 0,5) um ca. 20 %.
12. Die Bestimmung von  $\beta_{BZ}$  führt bei den Betonen ohne LP-Mittel zu einer eindeutigen Differenzierung zwischen geschädigten und ungeschädigten Probekörpern. Der Ein-

fluß der verlängerten Nachbehandlung hinsichtlich der Reduzierung der inneren Schädigung zeichnet sich nach 56 FTW bis zu einem w/z-Wert von 0,55 ab.

13. Der berechnete Abfall der Druckfestigkeit  $\beta_{D(US)}$  während der FTW-Prüfung stellt die Änderung des dynamischen E-Moduls  $E_D$  als Kenngröße der inneren Schädigung in analoger Weise dar. In Abhängigkeit von der Betonrezeptur ist der Abfall von  $\beta_{D(US)}$  höher als der Abfall des dynamischen E-Moduls  $E_D$ . Die Ermittlung des Abfalls der wahren Druckfestigkeit  $\beta_{wm}$  während der FTW-Prüfung ist ungeachtet des enormen Prüfaufwandes aufgrund der Mikrorisse, die bei Druckbelastung zusammengedrückt werden, wenig aussagekräftig.
14. Ein Abfall des dynamischen E-Moduls um 40 % bedeutet bei den untersuchten Betonen, unabhängig vom w/z-Wert, eine Reduzierung der Biegezugfestigkeit auf Werte von 2 bis 3 N/mm<sup>2</sup>.
15. Der Abfall des dynamischen E-Moduls  $E_D$  beträgt bei den CEM I- Betonen ohne LP-Mittel nach 56 FTW bis zum w/z-Wert 0,6 < 40 %. Die LP-freien CEM III/A- Betone zeigen bei einer Nachbehandlung von 6 Tagen bei allen Versuchsbetonen einen E-Modulabfall  $E_D > 40$  %. Die Anwendung der verlängerten Nachbehandlung führt bei den w/z-Werten 0,45 und 0,5 zu E-Moduländerungen < 40 %. Der Zusatz von LP-Mittel verhindert bei allen untersuchten Betonen, einschließlich der Betone mit einem w/z-Wert von 0,7, nennenswerte Gefügeschädigungen.
16. Die Biegewellenresonanz (Eigenschwingzeitmessung) reagiert sensibler auf Gefügeschädigungen, als die Dehnwellenresonanz und die Impulslaufzeit im Ergebnis des CIF-Testes. Die ermittelten Unterschiede des dynamischen E-Moduls zwischen Dehnwellenresonanz und der Änderung der Impulslaufzeit betragen durchschnittlich 10 bis 20 %. Alle drei genannten Verfahren zeigen vergleichbare Tendenzen hinsichtlich der eingetretenen inneren Schädigung. Aufgrund des geringen meßtechnischen Aufwandes und der Anwendbarkeit des Prüfverfahrens unabhängig von der Eigenfeuchte des Probekörpers ist die Eigenschwingzeitmessung als Normprüfverfahren gut geeignet.
17. Die dynamische Querdehnzahl  $\mu_d$  steigt mit zunehmender Wasseraufnahme und Gefügeschädigung an. Nach 56 FTW und 21 Tagen Lagerung im Normklima (Trocknung) bei  $T = 20^\circ \text{ C}$  und  $r. F. = 65 \%$  bleibt ein irreversibler Anstieg der Querdehnzahl auf Werte von  $\mu_d = 0,32$  bis  $0,33$  bestehen, der mit der eingetretenen Gefügeschädigung zu erklären ist. Unter Einbeziehung des Ausgangswertes von  $\mu_d = 0,25$  bis  $0,26$  entsteht bei der Untersuchung gleicher Betonrezepturen, jedoch an gedrunenen Probekörpern (z.B. Würfel), ein Berechnungsfehler für den dynamischen E-Modul von ca. 12 %. Die dynamische Querdehnzahl steigt bei den LP-Betonen trotz einer relativ hohen Wasseraufnahme nur geringfügig an.
18. Der Variationskoeffizient des dynamischen E-Moduls liegt bei den angewendeten Meßverfahren bei vergleichbaren Schädigungsgraden in gleicher Größenordnung. Er steigt mit zunehmender Gefügeschädigung an.

19. Der Frostangriff ist mit der Ausbildung eines Schädigungsgradienten, ausgehend von der Prüffläche des Probekörpers zum Kernbereich, verbunden. Dabei ist der Schädigungsfortschritt abhängig von der Dichtigkeit der Betonoberfläche, die von der Zementart, dem w/z-Wert und der Nachbehandlungsdauer abhängt. Die Kenntnis vom Schädigungsgrad und der Schädigungstiefe des oberflächennahen Bereiches ist für Bauwerksteile wichtig, die in ihrem Nutzungszeitraum dem Prozeß der Trocknung und Wiederbefeuchtung in erhöhtem Maße ausgesetzt sind. Da der Schädigungsgradient durch die Meßmethoden unterschiedlich abgebildet wird, muß dies bei der Bestimmung von praxisrelevanten Grenzwerten für eine zulässige Gefügeschädigung im Ergebnis der Prüfung des Frostwiderstandes beachtet werden.
20. Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit nach dem performance concept führen immer zur Ausbildung bzw. Überlagerung von Feuchte- und Schädigungsgradienten ausgehend von der Betonoberfläche. Um Gefügeschädigungen in den Randbereichen der untersuchten Probekörper erfassen zu können, ist die Entwicklung von zerstörungsfreien Meßverfahren erforderlich, die eine 2- bzw. 3-dimensionale Erfassung und Darstellung von elastischen Baustoffkennwerten gewährleisten.
21. Die Dämpfung (Q-Faktor), ermittelt aus der Resonanzschwingung der Biegewelle im Ergebnis der Eigenschwingzeitmessung, reagiert am sensibelsten auf Gefügeveränderungen. Die Anwendung von Dämpfungsmessungen für die Betonuntersuchung stellt jedoch hohe Anforderungen an vergleichbare Feuchtezustände im Probekörper. Eine Wasseraufnahme ohne Gefügeschädigung führt bereits zu einer hohen Zunahme der Dämpfung (Abfall des Q-Faktors um ca. 50 %). Als Normprüfverfahren sind Dämpfungsmessungen ungeeignet.

Der **dritte** Komplex umfaßt die Untersuchung der Gefügeentwicklung während der Hydratation von Normalbetonen (w/z-Wert: 0,5; 0,6; 0,7) zur Bestimmung der Erhärtungsdruckfestigkeit mit dem Ultraschallmeßsystem CONSONIC 60 durch Anwendung von kontinuierlichen und diskontinuierlichen Impulslaufzeitmessungen unter Einbeziehung der Betonrezeptur. Die Berechnung der Erhärtungsdruckfestigkeit erfolgte nach einer Zementsteinstruktur-Festigkeitsbeziehung. Die Schallgeschwindigkeit im verwendeten Zuschlagmaterial wird als Konstante betrachtet.

Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

22. Das Ultraschallmeßsystem CONSONIC 60 gibt tendenziell den Einfluß der Zementart, des Zuschlages und des w/z-Wertes auf die Entwicklung der berechneten Druckfestigkeit  $\beta_{D(US)}$  im Vergleich zur zerstörend ermittelten Druckfestigkeit  $\beta_{Wm}$  (mittlere Würfeldruckfestigkeit) richtig wieder.
23. Die an Normprismen aus Feinbeton (Größtkorn 8 mm) zerstörungsfrei ( $\beta_{D(US, NP)}$ ) und zerstörend ( $\beta_{D(NP)}$ ) ermittelten Druckfestigkeiten im Probekörperalter von 2, 3, 7, 14, 28 und 56 Tagen zeigen bei den CEM I- Betonen niedrigere Differenzen als bei den CEM III/A- Betonen. Sie betragen bis zum 28d-Wert bei den CEM I-



- Betonen  $< 15 \%$  und bei den CEM III/A- Betonen  $< 20 \%$  und werden bei allen Versuchsbetonen mit zunehmender Hydratationszeit größer.
24. Der an Betonwürfeln (Größtkorn 16 mm) der Kantenlängen von 150 mm durchgeführte Vergleich im Probekörperalter von 1, 3, 7, 14, 28, 56, 90 und 360 Tagen führt ebenfalls zu niedrigeren Differenzen zwischen  $\beta_{D(US, w)}$  und  $\beta_{wm}$  bei den CEM I- Betonen.
  25. Die kontinuierliche Bestimmung der Erhärtungsdruckfestigkeit mit der Tauchsonde (TS) im Zeitraum der frühen Hydratation bis zum 7. Tag ergibt bei den Betonen mit einem Größtkorn von 8 mm Differenzen zwischen  $\beta_{D(US, TS)}$  und  $\beta_{wm}$  am 7. Tag von  $< 15 \%$ . Die Betone mit einem Größtkorn bis 16 mm zeigen Differenzen  $< 20 \%$ . Die ermittelten Differenzen werden mit zunehmenden w/z-Werten größer.
  26. Durch die genaue Bestimmung der Schallgeschwindigkeit in den Zuschlägen und der Einschränkung der Zusammensetzung der Grobzuschläge auf eine Mineralart (Diabas) konnten optimale Bedingungen zur Berechnung der Erhärtungsdruckfestigkeit geschaffen werden. Die Optimierung der Eingabeparameter für die Schallgeschwindigkeit in den Zuschlagmaterialien stellt somit eine zwingende Voraussetzung für eine präzise Berechnung der Erhärtungsdruckfestigkeit dar. Bei Verwendung von Grobzuschlägen mit unterschiedlichen Mineralarten, muß die Schallgeschwindigkeit in den Mineralien sowie deren Masseanteil berücksichtigt werden.
  27. Die diskontinuierliche Bestimmung der Erhärtungsdruckfestigkeit erfordert eine sehr hohe Genauigkeit der Bestimmung der Impulslaufzeit und der Schallwegstrecken, die nur im Labor realisierbar ist.
  28. Die Auswertung der Höhe der Erstamplitude der P-Welle führt zu einer sensiblen Differenzierung im Erhärtungsverlauf von unterschiedlichen Mörtel- und Bindemittelrezepturen. Dafür sind gleichbleibende Ankoppelbedingungen zwingende Voraussetzung.
  29. Die Einbeziehung der Druckfestigkeit  $\beta_{D(US)}$  als Relativwert in die Durchführung von Homogenitätsuntersuchungen an Bauwerksteilen stellt eine wertvolle Ergänzung zu den Aussagemöglichkeiten der Impulslaufzeit dar. Schwachstellen im Betongefüge werden verstärkt abgebildet.

## 7 Ausblick

Zur Weiterführung der Untersuchungen zur Erfassung von Gefügeveränderungen sind folgende Gesichtspunkte einzubeziehen:

- Erweiterung der Anwendung der Eigenschwingzeitmessung mit der Zielstellung, einen definierten Frequenzabfall als Grenzwert zu benutzen, der gleichzeitig als Abbruchkriterium für die Prüfung des Frostwiderstandes, das heißt zur Begrenzung der Frost-Tauwechsel verwendet wird. Diese Vorstellung sollte für Anwendungen betrachtet werden, bei denen die Abwitterung der Betone eine untergeordnete Rolle spielt.
- Optimierung der Laufzeiterkennung, um die Auswertung von Mörtelrezepturen mit schneller Erhärtung sicherer zu gestalten. Die Bewertung der Erstampplitude der P-Welle ist verstärkt mit einzubeziehen. Dazu ist es notwendig, auf mögliche Änderungen der Ankoppelbedingungen während der Erhärtung zu reagieren.
- Anwendung des CONSONIC 60 zur Optimierung von Beton- und Mörtelrezepturen.
- Mit der Anwendung von Lasertechniken zur Signalerfassung sind Untersuchungen zur Verbesserung der Reflexionseigenschaften von Betonoberflächen bzw. optimierten Signalerfassung und -auswertung notwendig.

## 8 Literaturverzeichnis

1. WESCHE, K.: *Baustoffe für tragende Bauteile, Band 2: Beton, Mauerwerk*. Wiesbaden und Berlin: Bauverlag, 1993
2. STARK, J.: Die Dauerhaftigkeit von Beton zwischen Anspruch und Wirklichkeit. In: *Tiefbau* (2000) Nr. 4, S. 208-214
3. STARK, J.; WICHT, B.: *Dauerhaftigkeit von Beton*. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag, 2001
4. AUTORENKOLLEKTIV: *Beiträge des 38. Forschungskolloquium des DAfStb*. TU MÜNCHEN, Lehrstuhl für Baustoffkunde, Lehrstuhl Massivbau Bd. 38, 2000
5. *DIN 1045: Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung, Juli 1988*.
6. *DIN 1048, Teil 5: Prüfverfahren für Beton, Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper* ., 1991
7. *DIN EN 206-1, Entwurf 2000: Beton, Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*.
8. HILSDORF, H.-K.: 100 Jahre Forschung in der Betontechnologie - Von der Empirie zur Werkstoffwissenschaft. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 93 (1998) Nr. 12, S. 358-366
9. SPRINGENSCHMID, R.: Baustoff-Forschung und Ingenieurpraxis im Wandel der Zeit. In: *Bauingenieur* 75 (2000) Nr. 9, S. 613-620
10. AUBERG, R.: Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem CDF- und CIF-Test. FACHBEREICH BAUWESEN DER UNIVERSITÄT GH ESSEN: Dissertation, 1998
11. BOLLMANN, K.: Ettringitbildung in nicht wärmebehandelten Betonen. F. A. FINGER-INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE, Bauhaus-Universität Weimar: Dissertation, 2000
12. LUDWIG, H.-M.: Zur Rolle von Phasenumwandlungen bei der Frost- und Frost-Tausalz-Belastung von Beton. FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN AN DER HOCHSCHULE FÜR ARCHITEKTUR UND BAUWESEN WEIMAR-UNIVERSITÄT: Dissertation, 1996
13. JACOBS, F.: Dauerhaftigkeitseigenschaften von Beton. In: *Beton* 49 (1999) Nr. 5, S. 276-282

14. LUDWIG, H.-M.; STARK, J.: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von hütten-sandreichen HOZ - Betonen. In: *Wiss. Z. der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar - Universität* 40 (1994) Nr. 5/6/7, S. 111-117
15. SCHIEBL, P.: *Betondauerhaftigkeit-Umsetzung des Wissensstandes in Bemessungskonzepte*. 14. INTERNATIONALE BAUSTOFFTAGUNG, IBAUSIL, 20.-23. September Bauhaus-Universität Weimar, FIB, 2000, S. 1-0001 - 1-0020
16. SETZER, M. J.: *Die Mikroeislinsenpumpe - Eine neue Sicht bei Frostangriff und Frostprüfung*. 14. INTERNATIONALE BAUSTOFFTAGUNG, IBAUSIL, 20.-23. September Bauhaus-Universität Weimar, FIB, 2000, S. 1-0691 - 1-0705
17. FAGERLUND, G.: *Frost attack as a moisture mechanics problem*. 14. INTERNATIONALE BAUSTOFFTAGUNG, IBAUSIL, 20.-23. September Bauhaus-Universität Weimar, FIB, 2000, S. 1-0023 - 1-0038
18. FAGERLUND, G.: *Prüfvorschrift zum kritischen Wassersättigungsgrad*. LUND UNIVERSITY, Lund Institute of Technology, Division of Building Materials Lund: 1997
19. FAGERLUND, G.: The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concret. CBI, RILEM Recommendation Lund: 1997
20. STARK, J.; LUDWIG, H.-M.: Freeze-Thaw and Freeze-Deicing Salt Resistance of Concretes Containing Cement Rich in Granulated Blast Furnace Slag. In: *ACI Materials Journal* 94 (1997) Nr. 1, S. 47-55
21. STARK, J.; LUDWIG, H.-M.: Frost-Tausalz-Widerstand von HOZ - Betonen. In: *Beton* 47 (1997) Nr. 11, S. 646-656
22. BOLLMANN, K.; STARK, J.: Ettringitbildung in nicht wärmebehandelten Betonen - ein Dauerhaftigkeitsproblem. 14. Internationale Baustofftagung, IBAUSIL, 20.-23. September Bauhaus-Universität Weimar, FIB, 2000, S. 1-809 - 1-0829
23. *DIN 1164: Portland-, Eisenportland-, Hochofen- und Traßzement, Ausgabe Dezember 1986.*
24. MEHTA, P. K.: Mechanism of Sulfate Attack on Portland Cement Concrete - Another Look . In: *Cement & Concrete Research* 13 (1983) Nr. 3, S. 401-406
25. FREYBURG, E.; BERNINGER, A. M.: Bewertung alkalireaktiver Zuschläge außerhalb des Geltungsbereiches der Alkalirichtlinie des DAfStb: Kenntnisstand und neue Erkenntnisse. 14. Internationale Baustofftagung, IBAUSIL, 20.-23. September Bauhaus-Universität Weimar, FIB, 2000, S. 1-0931 - 1-0947

26. KRAUTKRÄMER, J.; KRAUTKRÄMER, H.: *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo: Springer-Verlag, 1986
27. HECKL, M.; MÜLLER, H. A.: *Taschenbuch der Technischen Akustik*. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1994
28. DEUTSCH, V.; PLATTE, M.; VOGT, M.: *Ultraschallprüfung, Grundlagen und industrielle Anwendungen*. Heidelberg, Berlin, New York : Springer-Verlag, 1997
29. GERTHSEN, Chr.; VOGEL, H.: *Gerthsen Physik*. 20. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1999
30. TRAUTWEIN, A.; KREIBIG, U.; OBERHAUSEN, E.: *Physik für Mediziner*. Berlin, New York: Walter de Gruyter Verlag, 1987
31. VEIT, I.: *Technische Akustik: Grundlagen der physikalischen, physiologischen und Elektroakustik*. 5. Aufl. Würzburg: Vogel Verlag, 1996
32. BERCKHEMER, H.: *Grundlagen der Geophysik*. 2. Aufl. Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft Verlag, 1997
33. POHL, E.: *Zerstörungsfreie Prüf- und Meßmethoden für Beton*. 2. Aufl. Berlin: Verlag für Bauwesen, 1964
34. ERFURT, W.; KROMPHOLZ, R.: Anwendungen von Dehnwellenmessungen für Baustoffuntersuchungen. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift Bauhaus-Universität Weimar* 42 (1996) Nr. 4/5, S. 95-100
35. NEISECKE, J.: Ein dreiparametriges, komplexes Ultraschall-Prüfverfahren für die zerstörungsfreie Materialprüfung im Bauwesen. TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG: Dissertation, 1974
36. RENTSCH, W.; KROMPHOLZ, G.: Zur Bestimmung elastischer Konstanten durch Schallgeschwindigkeitsmessungen. Fachberichte und Referate Bd. 7/8 Bergakademie Freiberg: 1961
37. KOTTAS, H.: Resonanzverfahren zur Messung mechanischer Schwingungen. In: *Z. Instrumentenkunde* 72 (1964) Nr. 7, S. 199-204
38. GROBE, Ch. U.: Quantitative zerstörungsfreie Prüfung von Baustoffen mittels Schallemissionsanalyse und Ultraschall.. UNIVERSITÄT STUTTGART, Fak. für Bauing.- und Vermessungswesen: Dissertation, 1996
39. SCHMIDT, H.: *Schalltechnisches Taschenbuch, Schwingungskompandium*. 5. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996

40. RENTSCH, W.; KROMPHOLZ, G.: Die Bestimmung der Poissonschen Zahl durch Schallgeschwindigkeitsmessungen. In: *Wiss. Zeitschrift der Hochschule für Bauwesen Leipzig - Sonderdruck* (1963), S. 177-181
41. TEODORU, G.: *Zerstörungsfreie Betonprüfungen, insbesondere Anwendung von Ultraschall; kritische Betrachtungen*. Düsseldorf: Beton-Verlag, 1989
42. *AASHTO Designation TP 18: Standard Test Method for determining the Fundamental Transverse Frequency and Quality Factor of Concrete Prism Specimens*. 1996
43. VOKES, E.A.; CLARKE, S.L.; JANSSEN, D.J.: *Damping Measurements for Nondestructive Evaluation of Concrete Beams*. DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, University of Washington, Seattle, Washington
44. JONAS, M.: Einsatzmöglichkeiten der Ultraschall-Frequenzanalyse für die zerstörungsfreie Prüfung von mineralischen Baustoffen und Bauteilen. FAK. BAUWESEN DER UNIVERSITÄT DORTMUND: Dissertation, 1996, S. 1-194
45. VOLKWEIN, A.: Zerstörungsfreie Prüfung von Naturstein durch Ultraschall-Schwächungsmessungen. In: *Materialprüfung* 24 (1982) Nr. 4, S. 119-124
46. LOHMEYER, G.: *Handbuch der Beton-Technik*. Düsseldorf: Beton-Verlag, 1997
47. WEIGLER, H.; KARL, S.; GRÜBL, P.: *Beton: Arten, Herstellung, Eigenschaften*. 2. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn, 2001
48. RÖHLING, St.; EIFERT, H.; KADEN, R.: *Betonbau*. Berlin: Bauwesen, 2000
49. EIBL, J.: *Betonkalender, Teil II*. Berlin: Ernst & Sohn, 1999
50. VINKELOE, R.: Prüfverfahren zur Ermittlung des dynamischen Elastizitätsmoduls von Betonprismen. In: *TIZ-Zbl.* 86 (1962) Nr. 10, S. 272-276
51. POHL, E.: Änderungen der dynamischen elastischen Konstanten von Betonprüfkörpern in Abhängigkeit von der Temperatur und der Feuchtigkeit. In: *Wiss. Z. d. Hochschule für Bauwesen Leipzig* (1975) Nr. 3, S. 157-159
52. ROTH, G.: Verwendbarkeit des dynamischen Elastizitätsmoduls, insbesondere für die Frostbeständigkeit des Betons. In: *Zement und Beton* 22 (1977) Nr. 1, S. 32-35
53. STERNECK, D.: Bericht über Anwendungsmöglichkeiten der Ultraschall-Impulsmethode- ohne Bestimmung der Druckfestigkeit. In: *Reihe: Bauforschung und Baupraxis, Berlin* (1984) Nr. 126, S. 7-11
54. SCHÖN, J.: Ingenieurgeophysikalische Aussagen aus geophysikalischen Messungen im Lockergestein. In: *DGG Mitteilungen* 1-2 (1992), S. 22-35

55. NAGY, A.: Determination of E-Modulus of Young Concrete with Nondestructive Method. In: *Journal of materials in civil engineering* (1997) Nr. 2, S. 15-20
56. NAGY, A.; THELANDERSSON, S.: Material Characterization of Young Concrete to Predict Thermal Stresses. Thermal Cracking in Concrete at Early Ages. Proceedings of the International RILEM Symposium held in Munich, October 10-12, E & FN Spon London: 1994
57. AL-ABIDIEN, H. Z.: Dynamische und statische Querdehnzahl des Betons in Abhängigkeit von den verschiedenen Einflußfaktoren - Literaturlauswertung und Entwicklung von Modellvorstellungen über Möglichkeiten ihrer Beschreibung und Berechnung im Zweistoffsystem Beton. FAK. FÜR BAUWESEN DER RHEINISCH-WESTFÄLISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE AACHEN: Dissertation, 1975
58. KNAKE, H.; SCHAU, H.; HOFFMANN, A.: Einsatz der Resonanzmethode zur Präzisionsbestimmung elastischer Konstanten und zur Defekterkennung in Bauteilen. In: *VDI-Berichte, 14. GESA-Symposium* (1991) Nr. 882, S. 403-412
59. MARTINEK: Die Bestimmung der Elastizitätsmoduln aus Eigenschwingungen von Würfeln und kurzen Prismen. In: *Acustica* 13 (1963), S. 123
60. SPINNER, S.; TEFFT, W. E.: A method for determining mechanical resonance frequencies and for calculating elastic moduli from these frequencies. In: *Proceedings ASTM* 61 (1961), S. 1-16
61. *ASTM C 1259-94: Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration.*, 1994
62. BUNKE, N.: *Dynamischer Elastizitätsmodul, Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zur DIN 1048*. DEUTSCHER AUSSCHUß FÜR STAHLBETON, Prüfung von Beton, Heft 422, 1991
63. STARK, J.; WICHT, B.: Zement und Kalk. Der Baustoff als Werkstoff Basel, Schweiz: Birkhäuser, 2000
64. STARK, J.; MÖSER, B.; ECKART, A.: Neue Ansätze der Zementhydratation, Teil 1. In: *Zement-Kalk-Gips* 54 (2001) Nr. 1, S. 52-60
65. STARK, J.; MÖSER, B.; ECKART, A.: Neue Aspekte der Zementhydratation. 14. Internationale Baustofftagung, IBAUSIL, 20.-23. September Bauhaus-Universität Weimar, FIB, 2000, S. 1-1093 bis 1-1109
66. MINDNESS, S.; YOUNG, J. F.: *Concrete*. PRENTICE-HALL INC. New Jersey: 1981

67. STARK, J.; MÖSER, B.; ECKART, A.: Neue Ansätze der Zementhydratation, Teil 2. In: *Zement-Kalk-Gips* (2001) Nr. 2, S. 114-119
68. KROPP, J.: Baustofftechnische Einflüsse auf Konstruktionen. Festschrift Berlin: Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, 1990
69. REICHELT, U.; NICKOL, U.; RÖTHIG, H.: Möglichkeiten für die Qualitätskontrolle von Frischbeton mit der Ultraschall-Meßtechnik. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 86 (1991) Nr. 6, S. 147-148
70. ODLER, I.; ABDUL-MAULA, S.; HENNICKE, U.: Verfolgung der Zementhydrationsvorganges aufgrund der Messung der akustischen Leitfähigkeit. In: *Mitteilungsblatt für amtliche Materialprüfung in Niedersachsen* (1985) Nr. 24/25
71. OECKNICK, J.: Untersuchungen zur Phänomenologie der Strukturbildung von Mörtel und Beton mittels Ultraschall. INGENIEURHOCHSCHULE COTTBUS: Dissertation, 1982
72. ROSTASY, F.; HARIRI, K.: Steifigkeitsermittlung von jungen Beton mittels Ultraschall. In: *Baustoffe für Konstruktionen und Architektur, Festschrift Prof. N. V. Waubke* (1996) Nr. 9, S. 13-21
73. PAULINI, P.; GRATL, N.: Stiffness Formation of Early Age Concrete. Thermal Cracking in Concrete at Early Ages. Proceedings of the International RILEM Symposium held in Munich, October 10-12, E & FN Spon London: 1994
74. JONAS, M.: Einsatzmöglichkeiten einer Ultraschall-Frequenzanalyse bei der Erhärtung anorganischer, mineralischer Bindemittel. DEUTSCHER AUSSCHUSS FÜR STAHLBETON: 25. Forschungskolloquium Ruhr-Universität Bochum: 1991
75. NEISECKE, J.; JONAS, M.; WOLLBOLD, F.: Ultraschall - eine vorteilhafte Methode zur zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe. In: *BMI, Festschrift Prof. N. V. Waubke* (1996) Nr. 9, S. 1-11
76. *DIN EN 196, Teil 3: Prüfverfahren für Zement, Bestimmung der Erstarrungszeiten und der Raumbeständigkeit, März 1990.*
77. *DIN 1048, Teil 1: Prüfverfahren für Beton, Frischbeton, Juni 1991.*
78. RÖSCH, A.: Die zerstörungsfreie In-Situ-Bestimmung der Betondruckfestigkeit. TU BERLIN, Fachbereich 9, Bauingenieurwesen und angewandte Geowissenschaften: Dissertation, 1999
79. EIBL, J.: *Betonkalender, Teil I.* Berlin: Ernst & Sohn, 1999



80. MÖSER, B.: *Untersuchungen mit ESEM, FEG*. BUW, F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, 2001
81. GRANDET, J.; OLLIVER, J.: New Method for the Study of Cement Aggregate Interface. Proc. 7<sup>th</sup> Int. Congr. on the Chemistry of Cement Paris: 1980, S. VII-85 - VII-89
82. TEODORU, G.: Zerstörungsfreie Prüfung von Beton. In: *Baugewerbe* (1992) Nr. 9, S. 21-25
83. JUNGBECKER, A.: Näherungsweise Berechnung der Druckfestigkeit von Mörtel bei Verwendung von Zementen unterschiedlicher Klinkerphasengehalte und Feinheit durch Messung der Resonanzfrequenz. BUW, F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde und Wilhelm-Dyckerhoff-Institut für Baustofftechnologie Wiesbaden: Studienarbeit, 2001
84. RÖTHIG, H.: Bestimmung der Druckfestigkeit durch Ultraschallprüfung. In: *Reihe: Bauforschung-Baupraxis, Berlin* (1983) Nr. 126, S. 22-30
85. BUNKE, N.: *Druckfestigkeit von Festbeton in Bauwerken und Bauteilen*. DEUTSCHER AUSSCHUß FÜR STAHLBETON, Prüfung von Beton, Heft 422, 1991, S. 22-25
86. Recommendations for Testing Concrete by the Ultrasonic Pulse Method. In: *Matreaux et Constructions* 2 (1969) Nr. 10
87. *TGL 33 437/02: Zerstörungsfreie Prüfung von Bauwerken und Bauteilen aus Beton, Bestimmung der Druckfestigkeit durch Ultraschallprüfung*. 1983
88. STERNECK, D.; ROETHIG, H.; KRATZSCH, W.; BRUHA, R.: Zerstörungsfreie Prüf- und Meßmethoden im Bauwesen, Beiträge (3). In: *Reihe: Bauforschung, Baupraxis, Berlin* (1988) Nr. 231, S. 3-28
89. REHM, G.; WAUBKE, N. V.; NEISECKE, J.: Ultraschall-Untersuchungsmethoden in der Baupraxis. INSTITUT FÜR MASSIVBAU DER TECHNISCHEN UNIVERSITÄT MÜNCHEN: Berichte aus der Bauforschung Heft 84 Berlin - München - Düsseldorf: Ernst & Sohn, 1973
90. *DIN 1048, Teil 4: Prüfverfahren für Beton, Bestimmung der Druckfestigkeit von Festbeton in Bauwerken und Bauteilen, Juni 1991*.
91. *DIN 1048, Teil 2: Prüfverfahren für Beton: Festbeton in Bauwerken und Bauteilen, Juni 1991*.

92. KÄBNER, B.; SESSNER, R.; PETKE, M.: Zur Auswertung von Ultraschallmessungen für die Bestimmung der Betondruckfestigkeit. In: *Betontechnik* (1989) Nr. 6, S. 179-180
93. KÄBNER, B.; SCHLÜBLER, K.-H.; SESSNER, R.; PETKE, M.: Die Hydratationskinetik von Zementen - Gelkonzentration und Betondruckfestigkeit. In: *Silikattechnik* 41 (1990) Nr. 1, S. 28-32
94. SCHLÜBLER, K.-H.: *Der Baustoff Beton: Grundlagen der Strukturbildung und der Technologie*. BAUINGENIEURINSTITUT CHARKOV, Otar Petrovich Mcedlov-Petrosjan 1. Aufl.
95. GEBAUER; KÄBNER; KROMPHOLZ, R.: *CONSONIC 60, Meßgerät und Meßmethode zur zerstörungsfreien Prüfung von Betondruckfestigkeit mit Ultraschall*. COBET-INGENIEURBÜRO COTTBUS, 1999
96. KÄBNER, B.: Zerstörungsfreie und kontinuierliche Bestimmung von Erhärtungsdruckfestigkeiten durch Ultraschall-Messung. Congress dokumentation for the 45 th Ulm Concrete and Precast Concrete Congress Ulm: 2001, S. 107-108
97. KÄBNER, B.; FREY, P.; GEBAUER, G.; OECKNICK, J.: Ultrasonic Measurement for the determination of Strength Development of Hardening Concrete. Proceedings of the International Symposium "Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)" 26.-28. September Berlin: 1995, S. 1165-1168
98. GROßE, Ch.: Verbesserung der Qualitätssicherung von Frischbeton mit Ultraschall. Congress dokumentation for the 45 th Ulm Concrete and Precast Concrete Congress Ulm: 2001, S. 102-103
99. GROßE, Ch.; KÖBLE, St.; REINHARDT, W.: Ultraschall, Raster-Elektronenmikroskopie und Kernresonanzspektroskopie-Untersuchung der Hydratation von zementgebundenen Materialien. In: *Otto-Graf-Journal* 11 (2000), S. 141-156
100. WEBER, J.; KÖHLER, W.: Zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden an Steindenkmalen. persönliche Mitteilungen, 1999
101. GRÜBL, P.; KROGGEL, O.; JANSOHN, R.; RATMANN, M.: Die zerstörungsfreie Prüfung von Betonbauteilen mit dem Ultraschall-Impuls-Echo-Verfahren. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 91 (1996) Nr. 12, S. 297-302
102. JANSOHN, R.: Amplitudenstatistik zur Bewertung von Ultraschallrückstreuungssignalen bei Beton. DEUTSCHER AUSSCHUß FÜR STAHLBETON: 39. DAfStb-Forschungskolloquium Darmstadt: 2000, S. 213-222

103. KRIEGER, J.: Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren bei Betonbrücken. In: *Bautechnik* 73 (1996) Nr. 1, S. 23-31
104. KRIEGER, J.; KRAUSE, M.; WIGGENHAUSER, H.: Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethode für Betonbrücken. BAST, Heft B 18: Brücken- und Ingenieurbau Bergisch Gladbach: 1998
105. *Merkblatt B4: Ultraschall-Impuls-Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile*. DGZFP-AUSSCHUß FÜR ZERSTÖRUNGSFREIE PRÜFUNG IM BAUWESEN (AB), Unterausschuß Ultraschallprüfungen Bd. 5 Berlin: 1993
106. SCHICKART, M.: Towards SAFT-Imaging in Ultrasonic Inspection of Concrete. Proceedings of the International Symposium "Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)" 26.-28. September Berlin: 1995
107. FLOHRER, C.: Instandsetzung von Spannbetonbrücken. In: *Beton-Instandsetzung* (1997) Nr. 1, S. 163-173
108. KRIEGER, J.: Ultraschall- und Impact-Echo-Verfahren zur Zustandsuntersuchung von Spannkänen. DGZFP-BERICHTSBAND 66, Vortrag 6: Fachtagung Bauwerksdiagnose - Praktische Anwendungen München: 1999, S. 59-71
109. REINHARDT, H.-W.; GROBE, Ch.; WEILER, B.; BURR, E.: Detektion und Lokalisierung von Rissen und Fehlstellen in Stahlbeton und Faserbeton. In: *Ergebnisbericht SFB 381, Teilprojekt A6; Uni Stuttgart* (1997), S. 127-153
110. SANSALONE, M.; CARINO, N. J.: Detection of Voids in grouted Ducts Using the Impact-echo method. Darmstädter Massivbau-Seminar, Zerstörungsfreie Prüfmethoden am Bauwerk Bd. 4, 1990, S. 3-19
111. GROBE, Ch.; WEILER, B.; GOLD, N.: Einsatz der Schallemissionsanalyse in der Mikroseismik. In: *Monografie* (1997) Nr. 57, S. 223-224
112. GROBE, Ch.; REINHARDT, H.-W.: Schallemissionsmessungen bei Pull-out-tests im Hinblick auf bruchmechanische Untersuchungen. In: *DAfStb-Forschungskolloquium* (1994), S. 239-250
113. *DIN EN 13296: Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit, Entwurf Oktober 1998*.
114. JONES, R.; FACAOARU, I.: RILEM Recommendation NDT 1: Testing of Concrete by the ultrasonic Pulse Method. In: *Materials and Structures* 2 (1969) Nr. 10, S. 275-284

115. *ASTM C 597-83: Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete*
116. *British Standard 4408: Recommendations for Non-destructive Methods of test for Concrete-Measurment of the velocity of ultrasonic pulses in concrete.* LONDON, 1974
117. KROMPHOLZ, R.: *Geotron, LightHouse 97, Software-Handbuch zur Prüfung von Beton und Naturstein.* GEOTRON ELEKTRONIK, 1999
118. SCHICKERT, M.: Einfluß der frequenzabhängigen Schallschwächung auf die Ultraschall-Laufzeitmessung an mineralischen Stoffen. In: *DGZfP-Jahrestagung* (1994) Nr. 4, S. 479-485
119. DZENIS, W.: *Anwendung von Ultraschall zur Prüfung von Beton und Baukeramik auf Fehler und Festigkeit.* POLYTECHNISCHES INSTITUT RIGA/UDSSR Bd. 28, 1986, S. 109-115
120. SETZER, M. J.; AUBERG, R.: CIF-Test - Prüfverfahren des Frostwiderstandes von Beton. In: *Beton + Fertigteil-Technik* (1998) Nr. 4, S. 94-105
121. MAYER, P.; TIETZ, R.; BAUMGART, M.; JACOBS, F.; FLECHSIG, Ch.: Ergebnisse hochauflösender ultraschalltomographischer Untersuchungen an Bohrkernen. In: *Z. geol. Wiss.* 25 (1997) Nr. 1/2, S. 229-237
122. MAYER, P.; TIETZ, R.; FLECHSIG, Ch.; JACOBS, F.: Modelluntersuchungen zur petroakustischen Geschwindigkeitstomographie an Bohrkernen. In: *Z. geol. Wiss.* 22 (1994) Nr. 3/4, S. 485-487
123. SCHULZ, D.: *PC-gestützte Mess- und Regeltechnik, Grundlagen und praktische Anwendungen.* 3. Aufl. München: Franzis-Verlag, 1994
124. DILLMANN, R.: Dicke der Betondeckung. In: *Beton* 44 (1994) Nr. 5, S. 6-10
125. TARIF, P.; BOURBIE, T.: Experimental comparison between spectral ratio and rise time techniques for attenuation measurement. In: *Geophysics Prospecting* 35 (1987), S. 668-680
126. LABEK: *Die zerstörungsfreie Materialprüfung mit mechanischen Schwingungen.* LABEK, Labor- und Betriebselektronik: Betriebsanleitung, 1997
127. REICHARDT, H.; MEUCHE, W.: Ein Beitrag zur Präzisionsbestimmung elastischer Kennwerte mit der Resonanzmethode. UNIVERSITÄT JENA: Dissertation, 1983
128. LEMMENS, J. W.: *Elastische Materialeigenschaften, Handbuch zum GrindoSonic Meßgerät.* J. W. LEMMENS-ELEKTRONIKA NV, Research Park Leuven/Belgien: 1994

129. Norm NBN B 15-230: *Betonprüfung-Zerstörungsfrei Prüfung - Messung der Resonanzfrequenz*. Belgien: 1976
130. STARK, J.; ERFURT, W.; KÖHLER, W.: *Antrag Teilprojekt B1 des SFB 524: Werkstoffe und Konstruktionen für die Revitalisierung von Bauwerken*. BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR, FIB, 1999
131. MEYER, E. H.; RADTKE, U.; CROSTACK, H.-A.: Zerstörungsfreie Werkstoff- und Bauteilprüfung mittels laserinduziertem Ultraschall und holographischer Schallfeldabbildung. UNIV. DORTMUND, FB Maschinenbau, Lehrstuhl für Qualitätswesen: Forschungsverbundprojekt, 1997
132. POPOVICS, J. S.; ROSE, J. L.: A Survey of Developments in Ultrasonic NDE of Concrete. In: *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control* 41 (1994) Nr. 1, S. 140-143
133. SOBOTT, R.: *Laser-Reinigung polychromer Natursteinoberflächen - Grundlagen, Möglichkeiten, Grenzen*. LABOR FÜR BAUDENKMALPFLEGE NAUMBURG DBU, 2000, S. 1-8
134. EICHLER, J.; EICHLER, H.-J.: *Laser, Laser in Technik und Forschung*. 5. Aufl. Berlin: Springer Verlag, 1998
135. JESSE, K.: *Laser, Grundlagen und moderne Trends*. Berlin und Offenbach: VDE, 1999
136. *Handbuch Polytec Scanning Vibrometer*. POLYTEC PI, Inc. Waldbronn: 2000
137. MEIER, P.: Vibrationen auf der Spur, Messungen von Schwingungen mit Hilfe der Laserinterferometrie. In: *Maschinenmarkt* 21 (1991) Nr. 5, S. 1-5
138. LEWIN, A.; MOHR, F.; SELBACH, H.: Heterodyn-Interferometer zur Vibrationsanalyse. In: *Technisches Messen* 57 (1990) Nr. 9, S. 1-11
139. KRIEGER, J.; KRAUSE, M.; WIGGENHAUSER, H.: Bistatische Messung mit flächiger synthetischer Apertur und Laservibrometer als Sensor. BAST, Heft B 18: Brücken- und Ingenieurbau Bergisch Gladbach: 1998
140. ELLIS, B.: The Combined Use of Remote Laser Measurements and Simple Modal Analysis. Proceedings of the International Symposium "Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)" Bd. 1 Berlin: 1995, S. 319-326
141. SCHROTH, G.; OSTERRIEDER, P.; BEIROW, B.: Dynamic Diagnostic of TV Towers. Proceedings of the International Symposium "Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)" Berlin: 1995, S. 877-885

142. KROMPHOLZ, R.: *Persönliche Mitteilungen*. GEOTRON ELEKTRONIK, 2001
143. SCHUPPE, F.: Ein Beitrag zur Deutung des elastischen Verhaltens von Gesteinen beim Durchgang von Körperschall. In: *Gerlands Beiträge zur Geophysik* 75 (1966) Nr. 4, S. 319-323
144. SCHRAGE, I.; SCHUPPE, F.: Die Beeinflussung der dynamischen Poissonkonstanten durch Porosität und Eigenschaften der Porenfüllung. In: *Bergakademie* 20 (1968) Nr. 12
145. SPANGENBERG, E.: Ein fraktales Modellkonzept zu Berechnung physikalischer Gesteinseigenschaften und dessen Anwendung auf die elastischen Eigenschaften poröser Gesteine. GEOFORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM: Dissertation, Scientific Technical Report STR95/23, 1995
146. RISCHÉ, H.: Kombinierte P-S-Seismik. In: *Z. für angewandte Geologie* 35 (1989) Nr. 12, S. 341-347
147. SCHWARZ, W.; VENZMER, H.: Neue Möglichkeiten der Feuchtebestimmung an Mauerwerksmaterialien mit Hilfe von Ultraschallsignalanalysen. WTA-SCHRIFTENREIHE, Heft 6: Instandsetzung von Mauerwerk Freiburg: Aedificatio Verlag, 1995, S. 62-73
148. DIN EN 60825-1: Sicherheit von Laser-Einrichtungen, Teil 1: Klassifizierung von Anlagen, Anforderungen und Benutzer-Richtlinien. (1997)
149. ERFURT, W.; KÖHLER, W.; STARK, J.: Berührungslos arbeitende Ultraschallmeßverfahren für die Bauwerksdiagnose. In: *Thesis, wiss. Z. d. Bauhaus-Universität Weimar* 47 (2001) Nr. 5/6, S. 196-203
150. ERFURT, W.; KÖHLER, W.; STARK, J.: Berührungslos arbeitende Ultraschallmeßverfahren für die Bauwerksdiagnose. BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR, FIB: 2. Baustoffkolloquium 1./2. Oktober, 2001, Tagungsband, S. 39-45
151. SCRUBY, C. B.: Some Applications of Laser Ultrasound. In: *Ultrasonics* 27 (1989) Nr. 7, S. 195-209
152. PANZNER, M.: *Persönliche Mitteilungen*. FRAUNHOFER INSTITUT FÜR WERKSTOFF UND STRAHLTECHNIK Dresden: 2001
153. SETZER, M. J.: *Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Betonwaren*. FORSCHUNGSBERICHTE AUS DEM FACHBEREICH BAUWESEN UNIVERSITÄT GESAMT-HOCHSCHULE ESSEN, 1990

154. HARTMANN, V.: Optimierung und Kalibrierung der Frost-Tausalz-Prüfung von Beton CDF-Test.. UNIVERSITÄT GH ESSEN, Fachbereich Bauwesen: Dissertation, 1992
155. SETZER, M. J.; HARTMANN, V.: Verbesserung der Frost-Tausalz-Widerstands-Prüfung. In: *Betonwerk+Fertigteil-Technik* 57 (1991) Nr. 9, S. 73-82
156. SETZER, M. J.; FAGERLUND, G.; JANSSEN, D. J.: RILEM Recommendation: CDF-Test - Prüfverfahren des Frost-Tau-Widerstandes von Beton- Prüfung mit Taumittel-Lösung (CDF). In: *Beton + Fertigteil-Technik* 63 (1997) Nr. 4, S. 100-106
157. STARK, J.; LUDWIG, H.-M.: *The influence of the water quality on the frost resistance of concrete*. REPORT TO RILEM TC 117 IN TRONDHEIM (NORWAY) ON THE 14TH AND 15TH JUNE 1994
158. SETZER, M. J.: *CIF-Test - Test method of frost resistance of concrete*. RILEM TC 176 IDC Dänemark: 2001
159. SETZER, M. J.: Fracture Mechanics Testing of Frost - Damaged Concrete. RILEM: TC IDC 176 - Minutes of the 6<sup>th</sup> Meeting in Paris, 2000
160. SETZER, M.; PALECKI, S.: CIF-Test Test method of frost resistance of concrete. UNIVERSITÄT GH ESSEN: CIF-Recommendation-end, 2000
161. *ZTV-W für Schutz und Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219)*. BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, Abteilung Binnenschifffahrt und Wasserstraßen, 1997
162. SETZER, M. J.; AUBERG, R.: Freeze-thaw and deicing salt resistance of concrete testing by the CDF method, CDF resistance limit and evaluation of precision. In: *Materials and Structures* 28 (1995) Nr. 175, 1/2, S. 16-31
163. *DIN 4226 Teil 1: Zuschlag für Beton - Zuschlag mit dichtem Gefüge - Begriffe, Bezeichnungen und Anforderungen. Ausgabe April 1983*
164. SETZER, M. J.: Bewertung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Transportbeton. Schlußbericht zum Forschungsauftrag 3134 der Forschungsgemeinschaft Transportbeton Düsseldorf: Bau und Technik Verlag, 1999, S. 34 ff
165. WALZ, K.: *Herstellung von Beton nach DIN 1045, Betontechnologische Arbeitsunterlagen*. Düsseldorf: Beton-Verlag, 1971

166. WALZ, K.: Beziehung zwischen Wasserzementwert, Normfestigkeit des Zements (DIN 1164, Juni 1970) und Betondruckfestigkeit. In: *Beton* 20 (1970) Nr. 11, S. 499-503
167. SCHÄFER, A.: *Frostwiderstand und Porengefüge des Betons, Beziehungen und Prüfverfahren*. DAFSTB, Heft 167 Berlin: Ernst & Sohn, 1964
168. DAHMS, J.: Einfluß der Eigenfeuchtigkeit auf die Druckfestigkeit des Betons. In: *Beton* (1968) Nr. 9, S. 361-365
169. BURKERT, W.: *Untersuchungen zur grundsätzlichen baustofftechnischen und - technologischen Realisierbarkeit des Massenbetons der Gewichtsstaumauer Leibis/Lichte, Abschlußbericht zu den Untersuchungen Teil I*. F. A. FINGER-INSTITUT FÜR BAUSTOFFKUNDE, Bauhaus-Universität Weimar, 1999
170. ERFURT, W.; STARK, J.: Untersuchungen zum Schädigungsgradienten an frostbelasteten Betonprobekörpern. 14. Internationale Baustofftagung, IBAUSIL, Weimar, 20. bis 23. September, F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar Bd. 1, 2000, S. 797-807
171. ERFURT, W.; DIMMIG, A.; BODE, K.: Methods of determining the gradient of damage in polymer-modified mortar after freeze-deicing salt attack. Tenth International Congress on Polymers in Concrete and ICPIC/ICRI International Concrete Repair Workshop, May 21-25, Honolulu, Hawaii, 2001
172. BODE, K.: Untersuchungen zur Ermittlung von Schädigungsgradienten frost- bzw. frost-tausalz-belasteter Betone und Mörtel. BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR, FIB: Diplomarbeit, 2000
173. HÜBNER, A.: Innere Schädigung von Beton während der Prüfung des Frostwiderstandes. BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR, FIB: Diplomarbeit, 2001
174. ZIER, W.: *Persönliche Mitteilungen*. MFPA, Weimar, 2001
175. HENNICKE, T.: Bestimmung der Erhärtungsdruckfestigkeit von Beton mittels Ultraschall. BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR, FIB: Studienarbeit, 2000
176. SCHÖN, J.: *Petrophysik*. Berlin: Akademie-Verlag, 1983
177. *DIN EN 196, Teil 1: Prüfverfahren für Zement, Bestimmung der Festigkeit, März 1990*.
178. BREITENBÜCHER, R.: Zwangsspannungen und Rißbildung infolge Hydratationswärme. TU MÜNCHEN, Fak. Bauing.: Dissertation, 1988



179. HENNICKE, A.: Bestimmung der Druckfestigkeit von Beton mittels Ultraschallmessung. BAUHAUS-UNIVERSITÄT WEIMAR, FIB: Diplomarbeit, 2001
180. KÖHLER, W.: *Persönliche Mitteilungen*. LABOR FÜR BAUWERKSDIAGNOSE, Archäometrie und Geophysik, 2000
181. BOLLMANN, K.; MÖSER, B.; ERFURT, W.: Betontechnologische und mikroanalytische Untersuchungen zur Rißbildung in Betonfahrbahndecken. HOCHSCHULE FÜR ARCHITEKTUR UND BAUWESEN WEIMAR - UNIVERSITÄT, Lehrstuhl Baustoffkunde: Forschungsbericht FE-Nr. 08.144 R96L, 1997
182. BOLLMANN, K.; FREYBURG, E.; MÖSER, B.; ERFURT, W.: Vergleichende betontechnische und mikroanalytische Untersuchungen zur Entstehung von Oberflächenrissen in Betonfahrbahndecken. HOCHSCHULE FÜR ARCHITEKTUR UND BAUWESEN WEIMAR - UNIVERSITÄT, Lehrstuhl Baustoffkunde: Forschungsbericht FE.-Nr. 08.128 R93L, November 1995
183. ERFURT, W.; KÖHLER, W.: Homogenitätsuntersuchungen an Betonbauwerken mittels Ultraschall, Teil 1. In: *Thesis, wiss. Z. d. Bauhaus-Universität Weimar* 44 (1998) Nr. 1/2, S. 127-132

### Eigene Veröffentlichungen zum Thema

1. ERFURT, W.: Möglichkeiten von Gefügeuntersuchungen mit Ultraschall. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift HAB Weimar* 41 (1995) Nr. 6/7, S. 103-110
2. ERFURT, W.; KROMPHOLZ, R.: Anwendungen von Dehnwellenmessungen für Baustoffuntersuchungen. In: *Wissenschaftliche Zeitschrift Bauhaus-Universität Weimar* 42 (1996) Nr. 4/5, S. 95-100
3. DIMMIG, A.; ERFURT, W.: Neue Methoden zur Bestimmung der Eindringtiefe und Wirksamkeit von Verfestigern. In: *Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen* 3 (1997) Nr. 3, S. 235-252
4. STARK, J.; ERFURT, W.: Erfassung der inneren Schädigung von Beton durch Frostangriff. In: *Thesis, Wissenschaftliche Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar* 44 (1998) Nr. 1/2, S. 105-112
5. ERFURT, W.; KÖHLER, W.: Homogenitätsuntersuchungen an Betonbauwerken mittels Ultraschall, Teil 1. In: *Thesis, Wissenschaftliche Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar* 44 (1998) Nr. 1/2, S. 127-132
6. STARK, J., ERFURT, W.: Registration of Internal Damage of Concrete. 2<sup>nd</sup> RILEM Meeting TC-IDC, Tromsø, June 24-26, 1998
7. DOMBROWSKI, K.; ERFURT, W.; JANSSEN, D. J.: Identifying D-Cracking susceptible aggregates - a comparison of testing procedures. WORKSHOP OF RILEM TC IDC, Minneapolis, 1999
8. ERFURT, W.; STARK, J.: Untersuchungen zur inneren Schädigung von Beton durch Frostangriff mit zerstörungsfreien Prüfverfahren. In: DEUTSCHER AUSSCHUß FÜR STAHLBETON: 37. Forschungskolloquium, Weimar, 7./8. Oktober, 1999, S. 215-222
9. ERFURT, W.; STARK, J.: Untersuchungen zum Schädigungsgradienten an frostbelasteten Betonprobekörpern. 14. Internationale Baustofftagung, IBAUSIL, Weimar, 20. bis 23. September 2000, F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, Bd. 1, S. 0797-0807
10. DIMMIG, A.; Erfurt, W.; BODE, K.: Methoden zur Bestimmung des Schädigungsgradienten kunststoffmodifizierter Mörtel nach einer Frost-Tausalz-Belastung. 14. Internationale Baustofftagung, IBAUSIL, Weimar, 20. bis 23. September 2000, F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, Bd. 2, S. 1015-1022

11. ERFURT, W.; KÖHLER, W.; STARK, J.: Berührungslos arbeitende Ultraschallmeßverfahren für die Bauwerksdiagnose: 2. Baustoffkolloquium 1./2. Oktober 2001, Bauhaus-Universität Weimar, FIB, Tagungsband, S. 39-46
12. ERFURT, W.; DIMMIG, A.; BODE, K.: Methods of determining the gradient of damage in polymer-modified mortar after freeze-deicing salt attack. Tenth International Congress on Polymers in Concrete and ICPIIC/ICRI International Concrete Repair Workshop, May 21-25, Honolulu, Hawaii, 2001
13. ERFURT, W.; KÖHLER, W.; STARK, J.: Berührungslos arbeitende Ultraschallmeßverfahren für die Bauwerksdiagnose. In: *Thesis, Wissenschaftliche Zeitschrift der Bauhaus-Universität Weimar* 47 (2001) Nr. 5/6, S. 196-203

## 9 Anlagen

### 9.1 Mischungsentwurf zur Prüfung des Frostwiderstandes

Tabelle 9.1: Versuchsserien der CEM I- Betone

CEM I 32,5 R		0,45	0,45	0,5	0,5	0,55	0,55	0,6	0,6	0,7	0,7	0,5	0,5	0,55	0,55	0,6	0,6	0,7	0,7
w/z-Wert:		170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170	170
Wasser [l]		378	378	340	340	309	309	283	283	243	243	340	340	309	309	283	283	243	243
Zement [kg/m³]		3,116	3,116	3,116	3,116	3,116	3,116	3,116	3,116	3,116	3,116	3,116	3,116	3,116	3,116	3,116	3,116	3,116	3,116
Reindichte Zement [g/cm³]		2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60
Rohdichte Zuschlag [g/cm³]		1804	1804	1835	1835	1861	1861	1883	1883	1916	1916	1731	1731	1757	1757	1779	1779	1812	1812
Zuschlag [kg/m³]		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LP	LP	LP	LP	LP	LP	LP	LP
Zusatzmittel:		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,510	0,0204	0,464	0,0185	0,425	0,0170	0,364	0,0146
Dosierung 1) in [l]		1000	40	1000	40	1000	40	1000	40	1000	40	1000	40	1000	40	1000	40	1000	40
Mischung [l]:		170	6,80	170	6,80	170	6,80	170	6,80	170	6,80	169,5	6,78	169,5	6,78	169,6	6,78	169,6	6,79
Wasser:		378	15,11	340	13,60	309	12,36	283	11,33	243	9,71	340	13,60	309	12,36	283	11,33	243	9,71
Zement:		1804	72,15	1835	73,41	1861	74,44	1883	75,30	1916	76,65	1731	69,25	1757	70,28	1779	71,14	1812	72,49
Zuschlag (gesamt):																			
Zuschlagsaufteilung:	[%]																		
Sand bis 0,25 mm	5,5	99	3,968	101	4,038	102	4,094	104	4,142	105	4,216	95	3,809	97	3,866	98	3,913	100	3,987
Sand 0,25 bis 0,5 mm	8,5	153	6,133	156	6,240	158	6,328	160	6,401	163	6,516	147	5,886	149	5,974	151	6,047	154	6,162
Sand 0,5 bis 1,0 mm	8,0	144	5,772	147	5,873	149	5,955	151	6,024	153	6,132	139	5,540	141	5,623	142	5,691	145	5,800
Sand 1 bis 2 mm	9,5	171	6,854	174	6,974	177	7,072	179	7,154	182	7,282	164	6,579	167	6,677	169	6,759	172	6,887
Kies 2 bis 4 mm	14,5	262	10,462	266	10,645	270	10,794	273	10,919	278	11,115	251	10,042	255	10,191	258	10,316	263	10,512
Kies 4 bis 8 mm	22,0	397	15,873	404	16,151	409	16,378	414	16,567	422	16,864	381	15,235	387	15,462	391	15,652	399	15,949
Kies 8 bis 16 mm	32,0	577	23,088	587	23,492	596	23,822	602	24,097	613	24,529	554	22,161	562	22,491	569	22,766	580	23,198

Tabelle 9.2: Versuchsserien der CEM III/A- Betone

CEM III/A 32,5 NW-NA			0,45	0,45	0,5	0,5	0,55	0,55	0,6	0,6	0,7	0,7	0,5	0,5	0,55	0,55	0,6	0,6	0,7	0,7
w/z-Wert:																				
Wasser [l]			185	185	185	185	175	175	175	175	170	170	180	180	175	175	175	175	170	170
Zement [kg/m³]			411	411	370	370	318	318	292	292	243	243	360	360	318	318	292	292	243	243
Reindichte Zement [g/cm³]			3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,006	3,009
Rohdichte Zuschlag [g/cm³]			2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60	2,60
Zuschlag [kg/m³]			1724	1724	1760	1760	1831	1831	1854	1854	1909	1909	1678	1678	1727	1727	1750	1750	1805	1805
Zusatzmittel:			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	LP	LP	LP	LP	LP	LP	LP	LP
Dosierung 1) in [l]			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,540	0,022	0,477	0,019	0,438	0,018	0,364	0,015
Mischung [l]			1000	40	1000	40	1000	40	1000	40	1000	40	1000	40	1000	40	1000	40	1000	40
Wasser:			185	7,40	185	7,40	175	7,00	175	7,00	170	6,80	179,5	7,18	174,5	6,98	174,6	6,98	169,6	6,79
Zement:			411	16,44	370	14,80	318	12,73	292	11,67	243	9,71	360	14,40	318	12,73	292	11,67	243	9,71
Zuschlag (gesamt):			1724	68,98	1760	70,40	1831	73,23	1854	74,15	1909	76,36	1678	67,10	1727	69,07	1750	69,99	1805	72,21
Zuschlagsaufteilung:																				
		[%]																		
Sand bis 0,25 mm	5,5		99	3,968	101	4,038	102	4,094	104	4,142	105	4,216	95	3,809	97	3,866	98	3,913	100	3,987
Sand 0,25 bis 0,5 mm	8,5		153	6,133	156	6,240	158	6,328	160	6,401	163	6,516	147	5,886	149	5,974	151	6,047	154	6,162
Sand 0,5 bis 1,0 mm	8,0		144	5,772	147	5,873	149	5,955	151	6,024	153	6,132	139	5,540	141	5,623	142	5,691	145	5,800
Sand 1 bis 2 mm	9,5		171	6,854	174	6,974	177	7,072	179	7,154	182	7,282	164	6,579	167	6,677	169	6,759	172	6,887
Kies 2 bis 4 mm	14,5		262	10,462	266	10,645	270	10,794	273	10,919	278	11,115	251	10,042	255	10,191	258	10,316	263	10,512
Kies 4 bis 8 mm	22,0		397	15,873	404	16,151	409	16,378	414	16,567	422	16,864	381	15,235	387	15,462	391	15,652	399	15,949
Kies 8 bis 16 mm	32,0		577	23,088	587	23,492	596	23,822	602	24,097	613	24,529	554	22,161	562	22,491	569	22,766	580	23,198

1) 1,5 ml/kg Zement

## 9.2 Mischungsentwurf zur Prüfung der Erhärtungsdruckfestigkeit

Tabelle 9.3: Versuchsmischungen Beton mit Größtkorn 8 mm

Zementart	CEM I 32,5 R			CEM III/A 32,5 NW-NA			
w/z - Wert	0,50	0,60	0,70	0,50	0,60	0,70	
Wasser [l]	215	210	210	210	205	205	
Zement [kg/m³]	430	350	300	420	342	293	
Reindichte [g/cm³]	3,101	3,101	3,101	2,993	2,993	2,993	
Zuschlagsvolumen [dm³]	617,3	646,1	662,3	617,7	648,8	664,2	
Luftporen [l]	29	31	31	32	32	33	
Ausbreitmaß [cm]	45	45	45	44	44	44	
Verdichtungszeit [sec]	20	20	20	20	20	20	
Volumen [dm³]	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
Zuschlagsaufteilung	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	Anteile [%]
0,1 bis 0,5 mm	414,1	433,4	444,2	414,3	435,2	445,5	26%
0,5 bis 1,0 mm	161,1	168,6	172,8	161,2	169,3	173,3	10%
1,0 bis 2,0 mm	240,8	252,0	258,3	240,9	253,0	259,0	15%
2,0 bis 5,0 mm	346,9	363,1	372,2	347,1	364,7	373,3	20%
5,0 bis 8,0 mm	503,1	526,5	539,7	503,3	528,7	541,2	29%
Zuschlagsmenge [kg/m³]	1666,0	1743,7	1787,2	1666,9	1751,0	1792,3	100%
gemessen $\rho_f$ [kg/dm³]	2,32	2,32	2,31	2,31	2,31	2,31	
Luftgehalt [%]	2,9	3,1	3,1	3,2	3,2	3,3	

Tabelle 9.4: Versuchsmischungen Beton mit Größtkorn 16 mm

Zementart	CEM I 32,5 R	CEM III/A 32,5 NW-NA	
w/z - Wert	0,60	0,60	
Wasser [l]	210	205	
Zement [kg/m³]	350	342	
Reindichte [g/cm³]	3,101	2,993	
Zuschlagsvolumen [dm³]	675,8	679,3	
Luftporen [l]	13	15	
Ausbreitmaß [cm]	53	52	
Verdichtungszeit [sec]	20	20	
Volumen [dm³]	1000	1000	
Zuschlagsaufteilung	[kg]	[kg]	Anteile [%]
0,1 bis 0,5 mm	348,7	350,5	20%
0,5 bis 1,0 mm	123,5	124,1	7%
1,0 bis 2,0 mm	210,9	212,0	12%
2,0 bis 5,0 mm	227,9	229,1	12%
5,0 bis 8,0 mm	360,8	362,7	19%
8,0 bis 16,0 mm	569,7	572,7	30%
Zuschlagmenge [kg/m³]	1841,5	1851,1	100%
gemessen $\rho_f$ [kg/dm³]	2,31	2,31	
LP-Gehalt [%]	3,2	3,3	

## Lebenslauf

### Persönliche Angaben:

Name: Wolfgang Erfurt  
 Geburtsdatum: 28.08.1950  
 Geburtsort: Erfurt  
 Familienstand: verheiratet, 2 Söhne

### Schul Ausbildung:

1957 bis 1965 27. Polytechnische Oberschule in Erfurt  
 1965 bis 1969 Erweiterte Oberschule „G. E. Lessing“ in Erfurt – Abschluß Abitur

### Berufsausbildung:

1965 bis 1969 VEB Pressen- und Scherenbau Erfurt – Abschluß Facharbeiter als Maschinenbauer  
 1969 bis 1973 Direktstudium an der TH Karl-Marx-Stadt, Sektion Chemie und Werkstofftechnik, Abschluß Diplomingenieur

### Berufstätigkeit:

1973 bis 1976 VEB Büromaschinenwerk Sömmerda, Technologe in der Härterei im Bereich mechanische Vorfertigung  
 1976 bis 1992 VEB Mikroelektronik Erfurt, Technologe für Werkstoffe und Spezialhalbzeuge im Direktorat Forschung und Entwicklung. Mitarbeit in überbetrieblichen technologischen Zentren sowie Materialkomplexgruppen des Industriezweiges Elektrotechnik/Elektronik zur Koordination von technischen Forderungen zwischen Zulieferindustrie und Schaltkreisfertigung. Erarbeitung von Prüfverfahren im Rahmen der betrieblichen Qualitätssicherung.  
 1992 bis heute Wissenschaftlicher Mitarbeiter für Forschung und Lehre an der Hochschule für Architektur und Bauwesen, jetzt Bauhaus-Universität Weimar/ F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde;  
 Aufbau eines Labors zur zerstörungsfreien Baustoffprüfung, Mitarbeit an verschiedenen Forschungsthemen zur Dauerhaftigkeit von Beton und Ziegel, Durchführung von Bauschadensanalysen und Baustoffprüfungen im Rahmen von Gutachten, Betreuung von Studien- und Diplomarbeiten.  
 Mitarbeit im RILEM TC IDC - Internal Damage Concrete - und Mitglied des Sonderforschungsbereiches 524 „Werkstoffe und Konstruktionen für die Revitalisierung von Bauwerken“ der Bauhaus-Universität Weimar im Teilprojekt B1.  
 1999 bis 2000 Zugehörigkeit zur MFPA Weimar.